

## **Секция 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Председатель секции*

*Профессор кафедры «Автоматизация технологических  
процессов»*

*к.т.н., проф. А.В. Кондрашин*

*Секретарь секции ст. преподаватель Е.Л. Архангельская*

*Е.Д. Васильев, асп.; Э.К. Аракелян, д.т.н., проф.  
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД В ПОСТРОЕНИИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ АСУ ТП**

#### **Введение**

Управление технологическим процессом и эффективность технологического процесса выступают смежными понятиями. Автоматизированное управление технологическим процессом ограничено – рассматриваются процессы только со стороны качества управления технологического процесса. Работа электростанций в условиях рынка электроэнергии и мощности, ужесточение системных требований к качеству и эффективности технологических процессов, появление новых функций АСУ ТП, связанные с участием энергоблоков и электростанций в регулировании частоты и мощности в энергосистеме требуют нового подхода к построению современных АСУ ТП на базе программно-технических комплексов (ПТК). Используя состав традиционных функций АСУ ТП, для шага вперед следует определить концепцию, позволяющую решать также задачи нового плана – задачи по управлению эффективностью технологического процесса на всех уровнях управления.

#### **Перспективный подход**

Экономичность электростанции в целом определяется не только показателями технологического процесса, но и эффективностью АСУ ТП. Полномасштабная, эффективная, оптимальная, а потому идеальная, структура АСУ ТП является основой построения современной электростанции. Понимание АСУ ТП, как правило, редко выходит за рамки энергоблока, что вызвано сложившимися условиями по состоянию действующего оборудования электростанций. Для получения иде-

альной электростанции необходимо выйти на станционный уровень и рассматривать задачи, стоящие как на уровне энергоблока, так и перед всей станцией как объектом управления в целом. Представляем процесс построения не конкретного варианта АСУ ТП, будь то модернизация, либо создание нового объекта с технической стороны, а структуры принципиально новой АСУ ТП, состоящей из иерархически построенных задач автоматизированного управления технологическими процессами и их эффективностью.

В этом случае следует ожидать становления нового уровня АСУ ТП, касающегося постановки и решения оптимизационных задач. Следует определить концепцию построения системы, используя понимание общей структуры АСУ ТП, принимая во внимание иерархический принцип ее построения - централизованного или распределенного по уровням соответствующих задач управления. Представить и обосновать в виде иерархической структуры необходимых для управления процессами выработки электроэнергии и мощности всех задач, которые должны быть решены для обеспечения эффективности управления технологическим процессом. Этим качеством традиционно является эффективность самого технологического процесса. Иначе следует определить критерии качества применительно к эффективности использования информации о технологическом процессе. Так, например, расчет ТЭП, как функция АСУ ТП блочного уровня (и в редких случаях и для станционного уровня), присутствует в большинстве предлагаемых ПТК. Однако она важной роли для оперативного управления технологическими процессами не играет. Расчет ТЭП с точки зрения оптимального управления технологическими процессами будет иметь больший смысл, если будет рассчитываться в режиме, максимально приближенного к реальному, в онлайн режиме, и когда проводится не только расчет, но и анализ и сравнение фактических и нормативных ТЭП, выявляются причины отклонений и тут же формируются воздействия на соответствующие участки энергоблока для максимального их устранения. Расчет ТЭП можно сделать одной из функций АСУ ТП в полном понимании – с выработкой рекомендаций: расчет, анализ и управление технико-экономическими показателями по иерархическим уровням. Аналогично расчету ТЭП должен быть расчет текущей надежности блока и т.д.

Иерархическая структура функций и задач представляется интересной как для стороны заказчиков, так и для потенциальных исполнителей проектов по АСУ ТП. Традиционный перечень функций АСУ ТП является необходимым, но не достаточным условием эффективности использования расширенных программных и информационных воз-

возможностей современных ПТК. Реализуемый подход к функциям и задачам АСУ ТП подошел к своему пределу, когда ощутимого улучшения качества управления электростанцией в целом не происходит при сравнении конкурирующих вариантов реализации, что является серьезной причиной к отсутствию стремления к изучению современных проблем отрасли. На практике не решают те задачи, которые дают наибольший вклад в технико-экономическую эффективность разработки и внедрения АСУ ТП ТЭС – оптимизационные задачи станционного уровня. По данным [1] именно решение таких задач дает более 60% от возможного экономического эффекта при построении полномасштабных АСУ ТП на базе ПТК, что и позволяет делать АСУТП экономически выгодной.

Основные алгоритмы управления качеством технологических процессов общеизвестны и представлены технической литературе в качестве, необходимым для получения заданного технико-экономического эффекта от АСУ ТП, хотя и уместно отметить, что в прикладном программном обеспечении не всех ПТК они реализованы в достаточном объеме для построения высокоэффективной АСУ ТП будем исходить из условия: как должна выглядеть АСУ ТП, если все делать в полном объеме в части функций и задач АСУ ТП. Масштаб АСУ ТП и степень охвата функций станционного уровня – и определяют целесообразность разработки и внедрения высокоэффективной АСУТП. В состав функций АСУТП станционного уровня входит значительно больше задач, чем мы рассматриваем, но здесь акцент ставится на те задачи, которые в конечном итоге определяют технико-экономическую целесообразность либо модернизации, либо построения новой АСУТП на базе ПТК. Примерный перечень оптимизационных задач, входящих в состав функции АСУТП станционного уровня:

1) Выбор оптимальной стратегии организации выхода электростанции на оптовый рынок электроэнергии и мощности с решением следующих задач:

1.1. При известном графике вывода оборудования в ремонт и техническое обслуживание выбор (прогноз) оптимального состава генерирующего оборудования на операционные сутки с учетом системных требований и реального технического и экономического состояния оборудования;

1.2. Оптимальное планирование участия электростанции и каждого блока на различных секторах оптового рынка электроэнергии и мощности;

1.3. Оптимальное распределение прогнозированной на операционные сутки электрической нагрузки (и тепловой для ТЭЦ) при заданном

составе генерирующего оборудования для формирования заявки электростанции на рынок электроэнергии и мощности «на сутки вперед»;

2) Оптимальное управление оперативными режимами оборудования электростанции и каждого блока при выполнении диспетчерского графика с решением следующих задач:

2.1. Управление режимами работы оборудования при условии максимального выполнения диспетчерского графика по всем показателям (текущая нагрузка, выполнение принятых ранее и поступающих оперативно системных требований, скорости изменения нагрузки в переходных и пусковых режимах и т.д.);

2.2. Дооптимизация (уточнение ранее полученного решения) распределения текущей нагрузки между генерирующим оборудованием для каждого текущего часа с учетом оперативных требований системного оператора;

2.3. Обеспечение принятых обязательств по участию отдельных энергоблоков в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты в энергосистеме и т.д.

3) Управление техническим и экономическим состояниями оборудования электростанции в краткосрочном и долгосрочном интервалах времени с решением следующих основных задач:

3.1. Выбор оптимального состава систем мониторинга и технического диагностирования для оценки текущего технического и экономического состояний и прогнозирования их на период между средними и капитальными ремонтами;

3.2. Управление экономичностью блока за счет своевременного технического обслуживания и проведения профилактических работ по чистке поверхностей нагрева котла, конденсатора и т.д.;

3.2. Оптимальное управление техническим и ремонтным обслуживанием оборудования и блока по техническому состоянию с определением объемов и сроков проведения каждого вида ремонта (в долгосрочном аспекте времени):

4. Задачи типа «Онлайн режим» - один из основополагающих принципов нового подхода, например, расчет ТЭП с формированием воздействий на соответствующие участки энергоблока и т.д.

Традиционное понимание организации управления подразумевает структуру связей между объектом и оперативным персоналом, реализуемую с помощью технических средств автоматизации, которая позволяет вести технологический процесс на ТЭС в соответствующем режиме [2]. Поэтому, традиционная структура должна остаться без изменений, тем самым сохранив структуру традиционных функций и задач АСУТП, а должна использоваться таким образом, чтобы входить в

состав иерархической структуры полностью, формируя тем самым структуру процессов управления эффективностью.

#### Библиографический список

1. Асланян А.Ш., Аракелян Э.К., Панько М.А. К оценке технико-экономической эффективности разработки и внедрения АСУ ТП ТЭС, реализованных на базе программно-технических комплексов // Вестник МЭИ – М., - 2009, № 1, С. 99-106.
2. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов. 4-е изд., стереот.- М.:Издательский дом МЭИ, 2007.- 352 с., ил.

*Т. Н. Гуляка, Р. А. Гиндуллин, студ.; рук. Д.А. Гринюк, к.т.н, доц.  
(БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПИД-РЕГУЛЯТОРЕ

Одним из наиболее распространенных регуляторов на практике является ПИД-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор). Его широкое применение связано с универсальностью и большим количеством инструментов для анализа линейных систем. Но у алгоритма присутствуют и недостатки, в первую очередь, интегральное насыщение и регулирование объектов с существенным запаздыванием.

Интегральное насыщение – это наиболее типовое проявление режима ограничения управляющего воздействия, которое возникает в процессе выхода системы на режим в регуляторах с ненулевой постоянной интегрирования. Интегральное насыщение приводит к затягиванию переходного процесса. Аналогичный эффект возникает вследствие ограничения пропорционального и интегрального члена ПИД-регулятора. Однако часто под интегральным насыщением понимают совокупность эффектов, связанных с нелинейностью типа «ограничение». Эта нелинейность связана с естественными ограничениями на мощность, скорость, частоту вращения, угол поворота, площадь поперечного сечения клапана, динамический диапазон и т. п. Контур регулирования в системе, находящейся в насыщении (когда переменная достигла ограничения), оказывается разомкнутым, поскольку при изменении переменной на входе звена с ограничением его выходная переменная остается без изменений.

При большом запаздывании рекомендуется использовать упредитель Смита. Однако такое решение приемлемо только при постоянстве величины запаздывания. В случае его изменения контур регулирования ста-

новится неустойчивым.

Существуют различные пути повышения регуляторов и уменьшения интегрального насыщения. Современные вычислительные возможности микропроцессорной техники позволяют реализовать различные алгоритмы, что позволяет не ограничивать себя при исследованиях.

Известны работы [1-3], которые позволяют исключить интегральное насыщение за счет нелинейных преобразований ошибки. Путем выдвижения одинаковых требований к качеству настройки, предлагается сравнить потенциальные возможности нескольких нелинейных решений с учетом классической структуры ПИД-регулятора. Структурная схема управления, для которой проводились исследования, представлена на рис. 1.

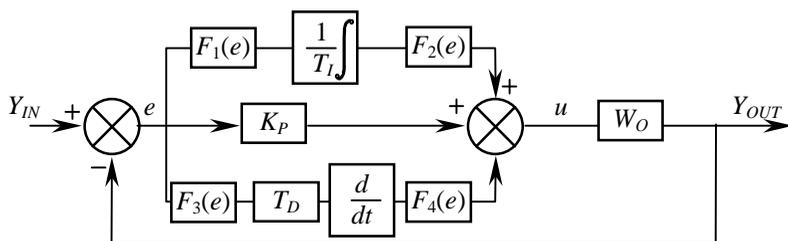


Рис. 1. Структурная схема управления.

$Y_{IN}$  – управляющее воздействие,  $Y_{OUT}$  – выходной параметр,  $e$  – ошибка управления,  $u$  – управляющее воздействие,  $F(e)$  – нелинейная функция от ошибки,  $K_P$  – коэффициент усиления регулятора,  $T_I$  – время интегрирования ПИ-регулятора,  $p$  – оператор Лапласа,  $W_O$  – передаточная функция объекта,  $W_{BK}$  – передаточная функция обратной связи.

В качестве нелинейной функции выбирались:

$$F(e) = \text{sign}(e) \ln(|e| + 1); \quad (1)$$

$$F(e) = \text{sign}(e) \sqrt{|e|}; \quad (2)$$

$$F(e) = \text{sign}(e) \cdot \left( \sqrt{|e| + 0,0025} - 0,05 \right); \quad (3)$$

$$F(e) = e^3, \quad (4)$$

$$F(e) = e^7, \quad (5)$$

$$F(e) = \text{tg}(e), \quad (6)$$

$$F(e) = \arctg(e), \quad (7)$$

$$F(e) = \sinh(e), \quad (8)$$

$$F(e) = \tgh(e), \quad (9)$$

Кроме, это исследовалась структура с переключением, смысл алгоритма работы которой – переход с аналогового на позиционный режимы в зависимости от уровня ошибки. При аналоговом режиме использовалась нелинейный ПИ-регулятор с использованием (1). Оптимизации подвергались значения настройки ПИ-регулятора и уровень переключения между режимами.

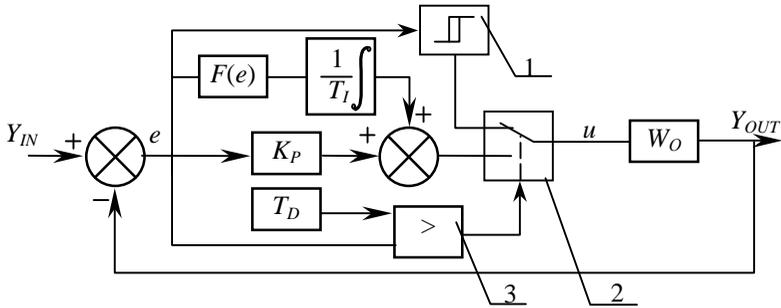


Рис. 2. Структурная схема управления с переключением.

$F(e)$  – нелинейная функция (1) от ошибки, 1 – позиционный регулятор (в случае положительной величины сигнал 0, при отрицательной сигнал 200% от стационарного значения  $u$ ); 2–переключатель информационных потоков; 3 – компаратор.

Для выше указанных нелинейностей, а также классического ПИД-регулятора, искались настройки исходя из минимизации следующего интегрального критерия

$$J = \int_0^{\infty} t^2 |e| dt \rightarrow \min. \quad (10)$$

В качестве общего объекта была выбрана передаточная функция со следующими параметрами:

$$W_O = \frac{1}{900p^2 + 60zp + 1} \exp(-\tau p), \quad (11)$$

$z$  – коэффициент колебательности;  $\tau$  – время запаздывание.

Величина коэффициент колебательности и время запаздывание при-

нимала фиксированные значения  $z = [0,5 \ 0,75 \ 1 \ 1,1 \ 1,2 \ 1,5 \ 2]$  и  $\tau = [0,5 \ 5 \ 10 \ 25 \ 40]$ .

Поиск настроек осуществлялся в программном пакете MatLAB путем численного моделирования, анализом переходного процесса на фиксированном диапазоне и с последующей корректировкой  $K_p$ ,  $T_I$  и  $T_D$ .

Поскольку одной из задач нелинейной структуры было борьба с интегральным насыщением, то после поиска для линейного объекта вводилось звено ограничения на управляющее воздействие и оптимизация проводилась повторно.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) линейный регулятор имеет преимущества по интегральному критерию только для объектов с малыми значениями  $z$  и величины запаздывания. Свои преимущества реализуются за счет большой величины коэффициента усиления. При этом время дифференцирования приобретало  $T_D$  значения превышающее время интегрирования  $T_I$ , что является недопустимым в условиях наличия шумов в измерительном тракте при регулировании технологических процессов. При введении ограничений на управляющее воздействие преимущества линейного регулятора исчезают. Лучшие результаты показывают алгоритмы с нелинейными преобразованиями, в частности с использованием функции логарифм, тангенс, гиперболических функций;

2) в случае, когда запаздывание сравнимо с постоянной времени или даже несколько больше нелинейные преобразования обеспечивают преимущества не только по интегральному критерию, но другим качествам переходного процесса. И здесь снова преимущества за нелинейными функциями логарифм, тангенс, арктангенс.

3) алгоритм с переключением показал хорошие результаты практически при любых вариациях с запаздыванием и коэффициентом колебательности. Некоторые показатели качества переходного процесса у них были лучше чем у конкурентов. Практическое использование такого алгоритма затруднено наличием ограничений на скорость нарастания управляющего сигнала.

4) использование функций с введением в степень и извлечением корня не продемонстрировали хороших результатов. Скорее всего это обусловлено нулевой величиной производной (или бесконечностью) при значении ошибки равной 0. Введение смещений функций усложнит процесс настройки при практическом использовании.

Окончательные выводы для прикладного использования можно бу-

дет сделать только при тестировании работы алгоритмов еще по каналу возмущения и работе при наличии помех.

#### Библиографический список

1. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. — СПб.: Невский проспект, 2001. — 557 с.
2. Пат. 5,570,282 США МКИ G05B 013/02. Multivariable nonlinear process controller P.D. Hansen, P.C. Badavas; The Foxboro Company. — № 333161; Заявл. 29.10.1996; Опубл. 01.11.1994; НКИ 700/41. — 15 с.
3. Пат 2120655 РФ МКИ G05B011/36. Пропорционально-интегральный регулятор с ограничениями выходных сигналов/ Говоров А.А., Баженов А.В., Говоров С.А. — № 98102222; Заявл. 19.08.1997; Опубл. 11.01.1995. — 5 с.

*Р. А. Шуленков, А. В. Товстыко, студ.; рук. Д.А. Гринюк, к.т.н, доц.  
(БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Одним из наиболее распространенных регуляторов на практике до сих пор является самым распространенным регулятором. Этому способствует высокий к.п.д. регулирования.

При выборе типа (закона регулирования) и значений параметров настройки регулятора для работы в системы автоматического регулирования следует исходя из требований обеспечения оптимальных условий протекания технологического процесса (ТП) в автоматическом объекте прежде всего сформулировать основные требования к качеству регулирования, т.е. определить основные показатели качества переходного процесса в САР, которые должен обеспечить автоматический регулятор при работе с конкретным регулируемым объектом.

Наиболее важными с точки зрения оптимальных условий протекания ТП основными показателями, характеризующими переходные процессы, являются следующие: показатели качества автоколебательных процесса регулирования; максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от заданного значения или динамический коэффициент регулирования; остаточное отклонение регулируемой величины от заданного значения или динамический коэффициент регулирования; обобщенная (интегральная) оценка качества переходного процесса регулирования; количество переключений в единицу времени.

Вид переходного процесса в САР, т.е. характер возвращения регули-

руемой величины к заданному значению после некоторого возмущения, выражаемый как правило графически, определяет качество регулирования.

График автоколебательного процесса регулирования с постоянной амплитудой колебаний показан при стабилизации температуры на рис. 1.

Основные сложности настройки позиционных регуляторов является проявление нелинейных свойств работы самого регулятора и объекта управления. На практике приходится проводить наблюдения и анализировать тренды на предмет выявления статической ошибки, динамических отклонений и количество переключений в единицу времени. Очень редко увеличение параметра в реальных объектах происходит с той же динамикой, как и уменьшение. Поскольку выход на стационарное автоколебание очень часто является длительным процессом, то с практической точки зрения, рациональным будет определить динамику при каких либо настройках регулятора, а затем путем математического регулирования найти настройки регулирования, при которых будет удовлетворительное значение динамического отклонения и статическая ошибка.

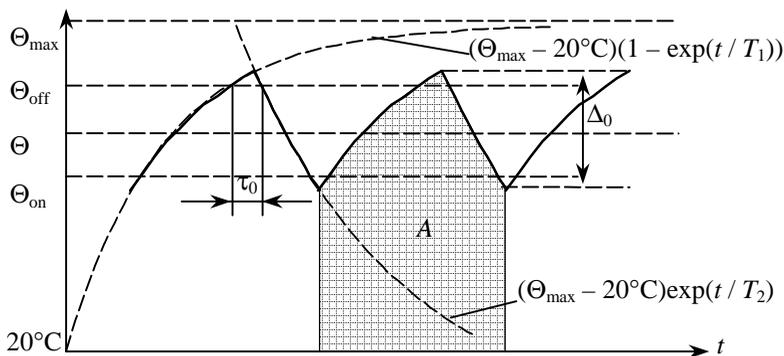


Рис. 1. График переходного автоколебательного процесса при регулировании теплового объекта

В позиционных регуляторах, которые выпускаются на сегодняшний момент, является значение уровня  $\lambda_{UP}$ , при котором должно быть сформировано выходная величина соответствует увеличению выходного параметра и значение  $\lambda_{DOWN}$  для уменьшения.

$$\mu = \begin{cases} \varepsilon > \lambda_{DOWN} \rightarrow \mu_{ON}, \\ \varepsilon > \lambda_{UP} \rightarrow \mu_{OFF}. \end{cases} \quad (1)$$

MatLAB представляется идеальной структурой для поиска оптимальных значений  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$ . Если рассмотреть структуру на рис. 2., где  $\mu$  - выход с регулятора; то передаточная функция в общем виде будет представлять

$$W(p) = \frac{\frac{a}{p}}{\frac{ab}{p} + 1} = \frac{a}{ab + p} = \frac{1}{1 + \frac{p}{ab}}. \quad (2)$$

Наличие заранее определенных передаточных функций, которые отражают динамику при увеличении выходного параметра и его уменьшении

$$W_{UP}(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad (3)$$

$$W_{DOWN}(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (4)$$

позволяют определить требуемые значения  $a$  и  $b$ , которые будут синхронно изменять с изменением управляющего воздействия позиционно-регулятора

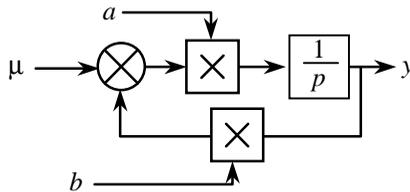


Рис. 2. Структура для создания управляемой динамики объекта управления позиционного регулятора

Полная структурная схема моделирования будет иметь вид как показано на рис. 3. Передаточная функция  $W_A(p)$  отражает динамику исполнительного устройства, чаще всего это звено запаздывания,  $W_{FB}(p)$  – передаточная характеристика датчика. В случае если  $W_A(p)$  транспортное запаздывание, звено по определению величины производной и ее знака необязательны и можно сразу управлять переключателями параметров  $a$  и  $b$ .

Для определения статической ошибки позиционного закона регулирования после выхода системы на стационарные колебания следует выходящий сигнал  $y$  проинтегрировать за целое число периодов. Для уменьшения издержек времени расчета можно воспользоваться звеньями динамики, в которых можно задать начальную координату, а не начинать моделирование с нуля. Измерительные преобразователи имеют параметр, который характеризует его точностные характеристики. При решении задачи оптимизации параметров настроек регулятора  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$  следует одновременно проверять на величину динамического отклонения с учетом погрешности измерительного преобразователя. Задача вхождения в требуемый диапазон статической погрешности может быть легко решена за счет малых значений  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$ , однако это приведет к большому количеству переключений в единицу силовых элементов и выходу их из строя.

Программный комплекс MatLAB имеет несколько возможностей по поиску оптимальных значений параметров настройки позиционного регулятора. Использование готовых Toolbox потребует времени на их освоение для отражения всех аспектов поставленной задачи. Можно решить поставленную задачу с помощью имитационного моделирования и написания соответствующего сценария изменения  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$  для достижения требуемого результата.

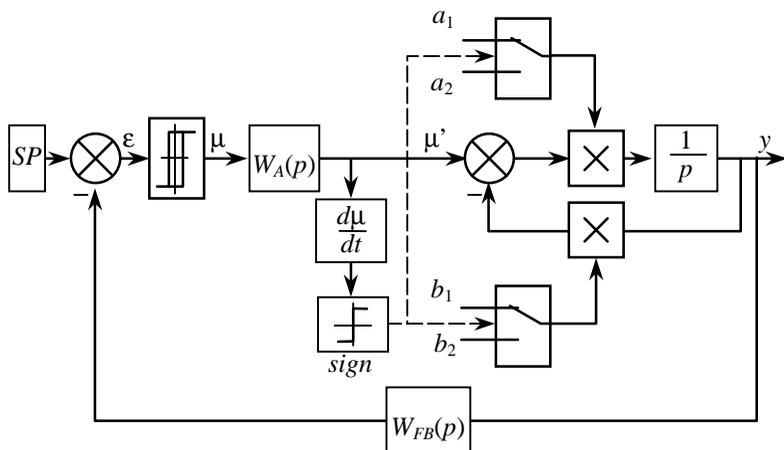


Рис. 3. Структурная схема моделирования системы с позиционным регулятором для объекта с переменными параметрами

Алгоритм поиска в m-файле был реализован следующий. Изначально

задавался достаточно большие значения и одинаковые пороги срабатывания регулятора  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$ . После каждой итерации значения уменьшались метод дихотомии до требуемой динамической точности. Зачем в зависимости от знака статической ошибки регулирования осуществлялось перераспределение параметров настройки релейного регулятора с целью ее (ошибки) устранения. В конце осуществлялась проверка на динамическую погрешность, пропорциональное увеличение или уменьшение  $\lambda_{UP}$  и  $\lambda_{DOWN}$  в зависимости от результата проверки и определение количества переключений в единицу времени.

Разработанная методика на среднем, по вычислительным ресурсам компьютера приводила к решению за короткий промежуток времени при ни более 20 итерациях.

*П.Ю. Худяков, асп.; И.А. Берг, студ.; Н.А. Мелкозеров, студ.;  
рук. Б.П. Жилкин д.ф.-м.н., проф.  
(УрФУ, г. Екатеринбург)*

## **СТРУКТУРНАЯ ДИАГНОСТИКА ФАКЕЛА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Дальнейшее развитие теории и практики управления топочными процессами невозможно без углубленного изучения механизмов и явлений, происходящих в том или ином тепломеханическом оборудовании.

При этом в каждом конкретном случае когерентные структуры, участвующие в процессах переноса, согласно структурной теории турбулентности [1] будут иметь специфические особенности. Следовательно, необходим новый общеметодический подход формирования таких принципов организации управления, которые будут эффективны в большинстве случаев. Формирование этих принципов возможно лишь путем обобщения сведений о механизме частных процессов. Накопление этих сведений может происходить путем сбора информации о динамических полях значений наиболее важных факторов. Для процесса теплообмена наиболее значимым фактором является температура.

Наиболее перспективным, с точки зрения получения информации о поле значений исследуемого параметра и возможности применения в промышленных установках, является тепловизионный метод диагностики [2]. Тепловизор позволяет получить динамическое поле температур в области наблюдения, регистрируя интенсивность инфракрасного излучения, испускаемого объектом наблюдения.

Основным преимуществом тепловизионных методов контроля является возможность бесконтактного замера поля температур с высокой точностью ( $\pm 2^\circ$  для промышленных моделей) и частотой сканирования (свыше 30Гц).

Но применение в качестве входного сигнала поля температур не может быть реализовано из-за низкой информативности параметра. Причиной этому является динамически меняющееся значение степени черноты факела. Следовательно, необходимо применение специальных методик обработки поля температур для дальнейшего использования в системах автоматического управления.

Анализ экспериментальных данных показал, что для решения ряда задач выявления границ факела, области касания факелом поверхности, а также определения области соударения газовых струй, перспективным является применение методики вычисления стандартного отклонения температуры во времени в каждой точке термограммы [3]. Вычисление стандартного отклонения производилось по формуле 1:

$$D(Tc[i, j]) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Tc_{[i,j,k]} - \overline{Tc_{[i,j]}})^2}{n-1}} \quad (1)$$

где:  $Tc_{[i,j,k]}$  - температура струи в отдельно взятой точке температурного ряда с координатами  $i, j$  в момент времени  $k$ ,  $\overline{Tc_{[i,j]}}$  математическое ожидание температуры струи в отдельно взятой точке температурного поля с координатами  $i, j$ .

На рис. 1. приведены результаты анализа стандартного отклонения поля температур факела, расположенного близко к нагретой металлической поверхности (а, б), и факела касающегося поверхности (в, г).

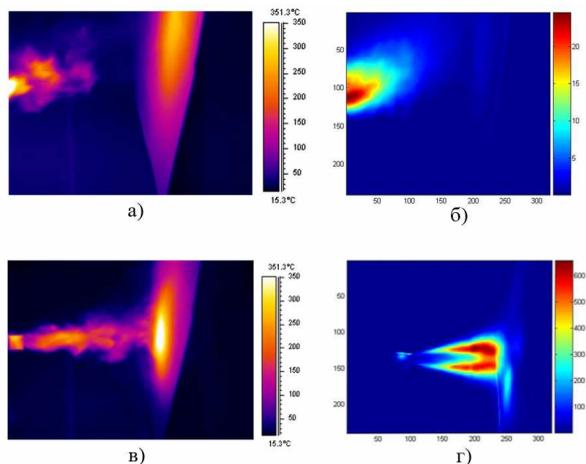


Рис. 1. Исходное тепловизионное изображение факела (а, в) и поле стандартного отклонения температуры (б, г). Инжекционная газовая горелка, (топливо – смесь изобутан 80%, бутан 15%, пропан 5%,  $G_T = 0,002$  кг/с).

В свою очередь, на рис. 2. приведены результаты обработки термограмм соударения двух воздушных струй, расположенных соосно.

Для идентификации структур в факел был применен алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Массив комплексных чисел вычислялся для каждой точки термограммы, при этом количество термограмм было равно 512, что было обусловлено особенностями работы алгоритма.

Результатом вычислений БПФ являлся ряд массивов данных [4, 5], некоторые из которых приведены на рис. 3. Анализ результатов показал, что в отдельные части факела пульсируют с различными частотами, которые могут быть легко выявлены при помощи алгоритмов анализа. Для случая инжекционной горелки и газообразного топлива, одной из характерных частот являлась частота 5 Гц. При помощи возмущающего воздействия микроструей воздуха с малым расходом, пульсирующей с выявленной частотой, удалось в несколько раз увеличить область в факеле, пульсирующую с частотой возмущения (рис. 3 в). Поле фаз колебаний в случае свободного и возмущенного факела значительно отличается (рис. 3 г), что свидетельствует о структурной перестройке, происходящей под воздействием возмущений.

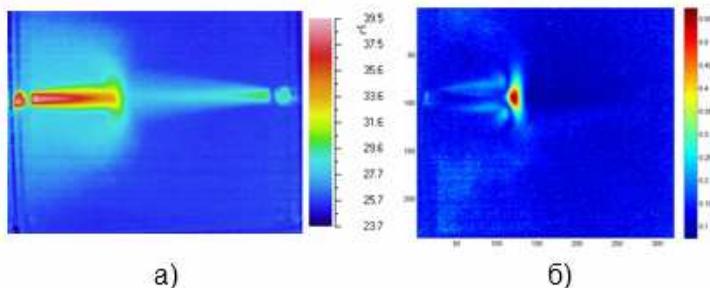


Рис. 2. Исходное тепловизионное изображение (а) и поле дисперсии температуры (б) соударяющихся струй, скорости струй  $w_1 = 69$  м/с,  $w_2 = 90$  м/с, температура струй  $t_1 = 57$  °С;  $t_2 = 40$  °С.

Таким образом, проведенное исследование динамического строения факела свидетельствует о том, что в факеле могут образовываться структурные области, которые пульсируют не только с различной частотой, но и в различной фазе. Это позволяет сформулировать один из принципов управления топочными процессами: при выборе управляющего воздействия для локального управления процессами в факеле, необходимо учитывать не только частоту, но и фазу, в которой колеблется контрольный параметр.

С практической точки зрения, данные полученные о поле температур, после математической обработки могут быть легко применены в автоматизированных системах управления. Следует отметить, что разработанные авторами алгоритмы анализа позволяют обрабатывать тепловизионные изображения в режиме реально времени, выявлять координаты появления тех или иных структур с целью предотвращения их воздействия.

Подобное воздействие на структуры в факеле с использованием обратной связи по полю температур позволяет решать вопросы не только определения положения факела, контроля наличия факела, касания факелом технологической поверхности, нахождения положения области взаимодействия факелов, но и задачи, связанные с прогнозированием поведения факела, анализ вероятности срыва или погасания факела, позонное регулирование температуры с целью достижения оптимальных характеристик процесса сжигания топлива.

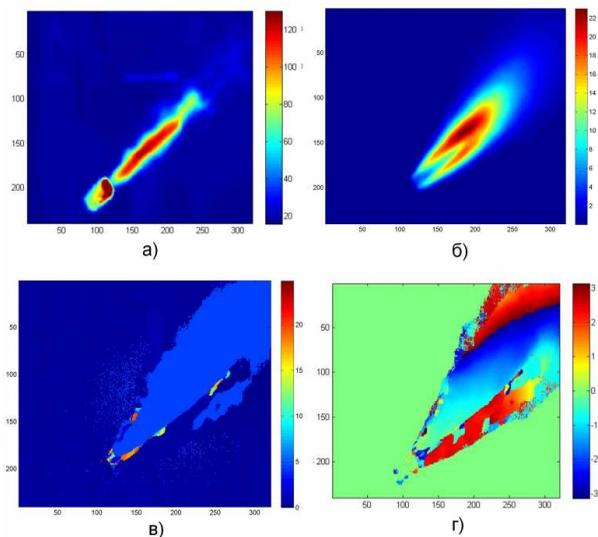


Рис. 3. Тепловизионное изображение факела (а), стандартное отклонение температуры (б), характерные частоты пульсаций (в), фаза пульсаций,  $rad$  (г). Инжекционная газовая горелка, (топливо – смесь изобутан 80%, бутан 15%, пропан 5%,  $G_T = 0,002$  кг/с,  $f = 5$ Гц).

#### Библиографический список

1. Климентович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. - М.: Наука, 1990. 320 с.
2. Дордж Д., Зайков Н.С., Зыскин Б.И., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. О применении видео и тепловизионного контроля для управления топочными процессами энергетических котлов // Электрические станции. 2012. №10. С. 34-35.
3. Способ тепловизионного определения турбулентности газового потока: патент RU 2400717 С2, G01K13/02. Заявл. 09.06.2008, № 2008123481/28. Опубл. 20.12.2009.
4. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Миренский В.Ю., Худяков П.Ю. Тепловизионная идентификация турбулентных структур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. 2010 №1. С. 155-158.
5. Жилкин Б. П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй // Механика жидкости и газа. 2013 №2. С. 104-111.

*Э.И. Бусурманова; К.Т. Тергемес к.т.н., доцент  
(КГУТиИ, г. Актау)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ КОТЛОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТОО «МАЭК-КАЗАТОМПРОМ»**

В настоящее время в западном регионе Казахстана потребность электроэнергии растет с каждым днем, и это связано с интенсивным развитием промышленности области. В ТЭЦ-х из доли вырабатываемой электроэнергии на долю компрессоров, насосов и вентиляторов приходится около 60%. Таким образом, на нужды электроприводов направляется около 60% всей вырабатываемой энергии во всем мире [1].

В наступившем XXI веке проблема энергосбережения, по сравнению с прошлым веком, приобрела несравненно более острый характер, и не обошла стороной Республику Казахстан. 2012 году подписан закон РК «Об энергосбережении и энергоэффективности», основными направлениями которого являются : рациональное и экономное использование топливно-энергетических ресурсов; внедрения энергосберегающих технологии, оборудование и материалы, позволяющие повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов; развитие возобновляемых источников энергии (альтернативная энергетика). Согласно этому закону стала важнейшим условием дальнейшего развития и повышения эффективности коммунального хозяйства, предприятий, населенных пунктов и всего государства в целом [2]. Существует множество пути энергосбережения в промышленных предприятиях. К ним можно отнести такие как: увеличение загрузки асинхронных двигателей, при малой нагрузки переключение обмоток со звезды на треугольник, замена асинхронных двигателей синхронными, использование частотных преобразователей для двигателей с переменной нагрузкой. Остановимся подробно на методе экономии электроэнергии за счет применения преобразователя частоты для насосной станции питательной воды [3]. Подача питательной воды в водяной тракт котлов энергоблоков ТЭС(1,2,3) ТОО «МАЭК-Казатомпром» производится питательными электрическими насосами (ПЭН) через регуляторы питания котла (РПК). Каждый блок ТЭС снабжен двумя питательными насосами, поддерживающими заданный

уровень воды в барабане котла. Схема подачи питательной воды через РПК показана на рисунке 1.

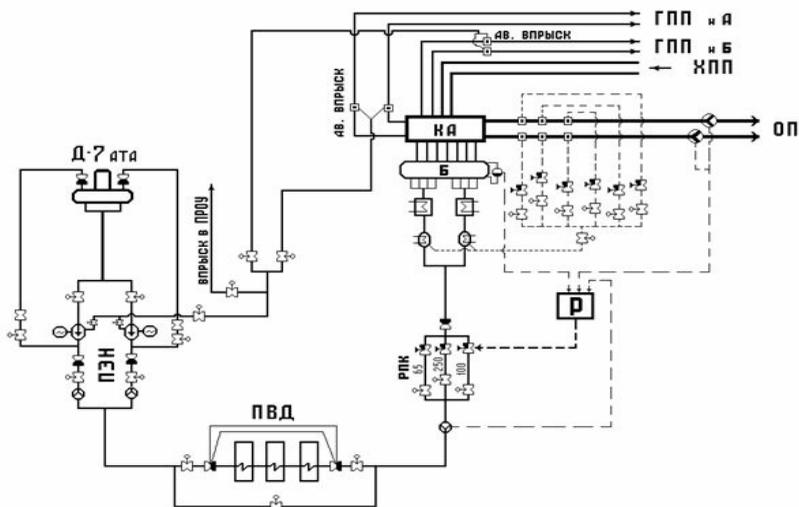


Рис. 1. Схема подачи питательной воды через РПК

Подача воды в барабан котла обеспечивается работой двух питательных насосных агрегатов с максимальной подачей 580 м<sup>3</sup>/час. Характеристики питательных насосов приведены в таблице 1. Рабочие колеса насосов приводятся в движение асинхронным электродвигателем номинальной мощностью 5 мВт. Характеристики электродвигателя приведены в таблице 2.

Таблица 1. Паспортные данные насосного агрегата

Марка ЭН агрегата	ПЭ 580-185-3
Номинальная подача, м <sup>3</sup> /час	580
Давление, развиваемое ЭН, МПа	18,8
Номинальная мощность ЭН агрегата, кВт	3590
КПД ЭН агрегата, номинальный	0,785

Регулирование уровня в барабане осуществляется регуляторами питания котла РПК- 65 (игольчатый), РПК-100 (шиберный) и РПК-250 (дисковый). Изменение расхода питательной воды на котёл производится дросселированием. Указанный способ имеет ряд недостатков:

**Таблица 2. Паспортные данные электродвигателя**

Марка электропривода	4А3М-5000/6000 УХЛ-4
Тип электропривода	АТД, с КЗ ротором
Номинальное частота вращения, об/мин	2985
Номинальное напряжение питающей сети, В	6000
Частота питающей сети, Гц	50
Мощность электропривода, кВт	5000
КПД электропривода	0,974

- из-за отсутствия регулирования скорости вращения ЭД питательного насоса создается большой перепад давления на регуляторах узла питания котла, который может достигать величины  $180 \text{ кгс/см}^2$ , особенно в пусковых режимах энергоблоков, а нормальный перепад давления на регуляторах не должен превышать  $20 \text{ кгс/см}^2$ ;

- происходит интенсивный износ регулирующего клапана в результате повышенного перепада давления на участке перед и за РПК;

- происходит интенсивный износ участка трубопровода питательной воды за РПК, который приходится менять при капитальном или текущем ремонте энергоблоков;

- интенсивный износ электрического привода РПК из-за больших перестановочных усилий, обусловленных повышенным перепадом давления на регулирующий орган [4]. При дроссельном регулировании давления в сети с помощью регулирующих клапанов (иногда их роль выполняют напорные задвижки агрегатов) изменяется расход в сети, и его гидравлическая характеристика сети сдвигается влево. Как это видно из рисунка - 2, с уменьшением расхода увеличивается давление в сети.

Характеристика напора насоса соответствует напорной характеристике насосного агрегата, а естественная характеристика сети (характеристика сети с максимальным расходом) — гидравлической характеристике сети. Точка пересечения этих характеристик является иде-

альной расчетной точкой совместной работы насосного агрегата и сети.

Используемый метод дросселирования не экономичен, и требует излишних расхода электроэнергии на приводы насоса. Поэтому для решения задач, связанных с регулированием давления в сети, необходимо передать процесс регулирования давления насосному агрегату. Так как изменяя частоты вращения привода насоса, мы сможем изменять и напорные характеристики.

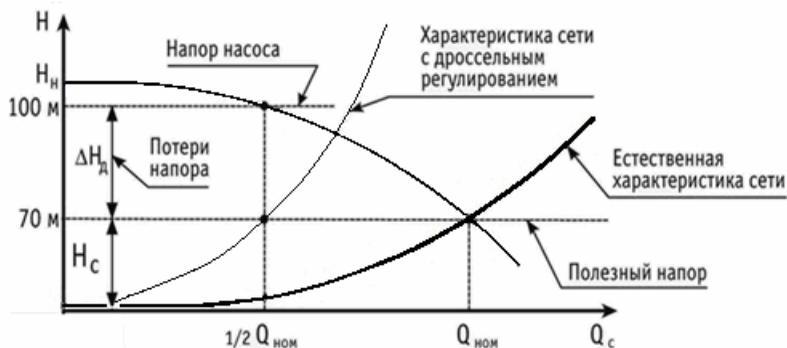


Рис. 2. Характеристики насосного агрегата и сети с дроссельным регулированием

Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует рис. 3, на котором кривая 1 соответствует номинальной (при номинальной частоте вращения привода) напорной характеристике, а кривые 2-4 – напорным характеристикам при пониженной частоте вращения.

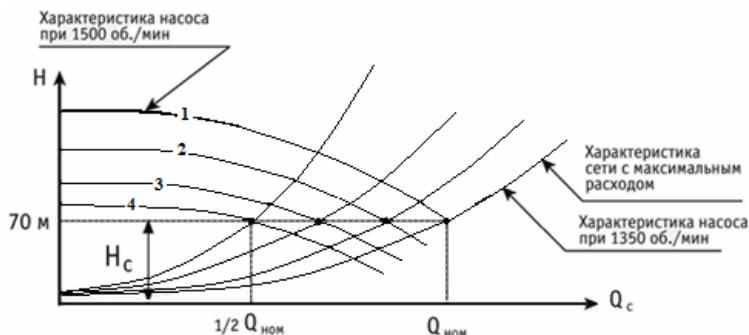


Рис. 3. Характеристики насосного агрегата и сети с частотным регулированием

При таком способе регулирования исключаются потери (нет дроссельных элементов), а значит, и потери гидравлической энергии [5].

ПЧ используется в теплоэнергетике как энергосберегающее оборудование для снижения затрат на собственные нужды на энергоснабжающих предприятиях, главным образом на тепловых электростанциях. В системах водоснабжения, охлаждения, смазки, вентиляции тепловой станции насчитывается сегодня несколько десятков нерегулируемых электроприводов. Суммарная мощность привода составляет порядка 1 – 2 мВт, единичные мощности отдельных приводов колеблются от 40 до 200 кВт и выше. Частотные преобразователи устанавливаются на тепловых электростанциях для управления приводом:

- питательных насосов,
- дымососов,
- дутьевых вентиляторов,
- компрессоров,
- сетевых и подпиточных насосов.

Применение частотного регулирования привода насосного агрегата позволяет повысить КПД самого насоса и таким образом получить экономический эффект.

Результаты проведенные зарубежными странами по внедрению ПЧ на насосные страны показали, что экономический эффект после внедрения не только повышение КПД, а еще увеличение срока службы насосного агрегата, а также минимизация затрат на насосные трубопроводы.

В настоящее время следующие зарубежные известные страны, занимаются изготовлением и выпуском высоковольтных электроприводов, отличающиеся по дизайну, по надежности и стоимости: Siemens (Германия), АВВ (Австрия), ShnaiderElektrik (Франция), Mitsubishi электрик (Япония), Веспер (канада), Приводная техника (Россия), НПП Уралэлектра (Россия, Екатеринбург) и т.д.

#### Библиографический список

1. **ЗАО «Комбарко»**. Внедрение преобразователей частоты на насосных станциях, технико-экономическое обоснование. Москва, 2008.
2. **Закон РК «Об энергосбережении»**, № 210-І (с изменениями и дополнениями по состоянию на 10.01.2006 г.)
3. **Краснов И.Ю., Похилкин А.А.** Статья на тему «Автоматизация технологического процесса насосной». Томск: Томский политехнический университет. 2010.

4. Тергемес К.Т. Отчет НИР «Исследование расходных характеристик основных и подпорных насосных станций (НПС ГҮҮ, ГНПС Атырау)». Алматы, 2006 .
5. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. М.: Энергоатом-издат. 2006 .

*М.В. Смирнова, студ.; рук. А.В. Кондрашин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ АСУ ТП В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ**

Автоматизированная система управления технологическими процессами предназначена для контроля и управления основными и вспомогательными технологическими процессами производства тепло- и электроэнергии на АЭС и обеспечения безопасности во всех режимах работы, включая аварийные ситуации и проектные аварии, а также экономичности работы АЭС в условиях нормальной эксплуатации.

АСУ ТП энергоблока представляет собой децентрализованную и пространственно распределённую по функциям и средствам иерархическую структуру. АСУ ТП включает в себя следующие уровни иерархии:

1) Уровень связи с ТОУ (датчики, пусковые устройства) – обеспечивает подготовку и проведение автоматических измерений параметров технологического процесса, контроля состояния оборудования, отработку управляющих команд автоматического и автоматизированного управления и защит (подача силового питания на исполнительные механизмы).

2) Нижний уровень автоматизации – обеспечивает прием и обработку данных автоматических измерений и контроля, обмен информацией с верхним уровнем, АСУ ТП, осуществляет реализацию алгоритмов управления системами безопасности, технологических защит и блокировок, автоматического и автоматизированного (по командам с БПУ и РПУ)

3) Верхний уровень АСУ ТП – обеспечивает обработку информации, ее архивирование, документирование и представление оперативному персоналу БПУ и РПУ, осуществляет формирование команд автоматизированного управления технологическим процессом энергоблока, обеспечивает передачу необходимой информации от АСУ ТП ЭБ через УПД в сеть АСУ П и СПНИ, а через коммутаторы межсер-

верного обмена в систему верхнего общестанционного уровня (СВСУ) для АРМ начальника смены станции (НСС) и АРМ локального кризисного центра, а также от СРВПЭ в АРМ СРВПЭ, размещенном в помещении ЛКЦ защищенного пункта управления (ЗПУ).

Локальная вычислительная сеть низовой автоматики (ЛВС НА, сеть нижнего уровня) принимает и передает в ПТК нижнего уровня автоматизации команды дистанционного управления из СВБУ, позволяет ПТК нижнего уровня автоматизации обмениваться командами защит и блокировок.

Сеть верхнего блочного уровня (сеть СВБУ) принимает сигналы от систем нормальной эксплуатации (СНЭ) и систем безопасности (СБ) через сеть дублированных шлюзов (коммутаторы НЭ и коммутаторы СБ1, СБ2), далее обрабатывая полученную информацию средствами СВБУ архивирует ее и предоставляет персоналу АЭС посредством АРМ СВБУ.

Для отображения информации, поступающей из 1 и 2 каналов СБ, в структуре АСУ ТП предусмотрены рабочие станции: АРМ СБ БПУ и АРМ СБ РПУ, которые подключены по цифровому, оптическому каналу связи через коммутаторы систем безопасности к сети иницирующей части СУЗ-УСБТ и исполнительной части УСБТ. Данные рабочие станции включают серверную функцию и независимы от других серверов СВБУ.

При создании объекта принимают важные решения направленные на повышение готовности блока к выработке электроэнергии, включая:

- резервирование и, при необходимости, разделение устройств нормальной эксплуатации для сведения к минимуму вероятности снижения мощности или останова блока при возникновении одного отказа активного элемента управляющих системах нормальной эксплуатации;
- применение в составе АСУ ТП диагностических систем оборудования РУ, позволяющих выявлять отказы оборудования и принимать своевременные компенсирующие меры для исключения негативных последствий отказа, в том числе, на первых этапах обкатки технологического оборудования на блоке.

АСУ ТП реализуется на базе программно-технических комплексов с использованием, как правило, цифровых каналов обмена информацией.

Заложенная в проект АЭС концепция безопасности основывается на применении в максимально возможной степени инженерных принципов концепции защиты в глубину или глубокоэшелонирован-

ной защиты, изложенных в действующих нормативных документах на использовании результатов анализа безопасности действующих АЭС.

Безопасность обеспечивается за счет выполнения полного комплекса технологий необходимых и достаточных для выполнения всех функций безопасности, включая защитные, локализирующие, обеспечивающие, управляющие, а также функции, направленные на предотвращение аварий и/или ограничения их последствий.

Совмещение функций безопасности с функциями нормальной эксплуатации при проектировании отдельных систем безопасности повышает функциональную готовность систем безопасности и сокращает количество оборудования. При этом перевод механизмов в режим выполнения функции безопасности осуществляется либо вообще без переключений, либо с минимальным их количеством.

Принцип единичного отказа при разработке систем безопасности применен в полном соответствии с действующим положением, то есть для каждого анализируемого исходного события этот принцип последовательно применяется по логике «или» по отношению ко всем системам безопасности, функционирование которых требуется при данном исходном событии.

Таким образом, для всей АС в соответствии с этим принципом, каждый раз учитывается только один дополнительный к исходному событию независимый отказ. Отказ может произойти как в режиме ожидания (скрытый отказ), так и в режиме функционирования системы после возникновения исходного события.

С точки зрения управления основными элементами энергоблока являются энергопреобразующие агрегаты (реактор, парогенератор, турбина, турбогенератор), связанные сетью проводников различных потоков: теплоносителей 1-го и 2-го контуров, химреактивов, масел, электроэнергии, воздуха и т.д. Каждый поток характеризуется структурой и параметрами.

Структура потока определяется состоянием (положением) исполнительных механизмов запорной, отсечной и регулирующей арматуры и "движителей" (насосы, вентиляторы, генераторы и пр.).

Параметры потоков (температура, давление, расход, концентрация и пр.) определяются их структурой, состоянием арматуры, движителей и других потоков.

В каждый момент времени  $t$  известно задание по параметрам основных выходных потоков. Целью управления энергоблоком является, при безусловном обеспечении безопасности, поддержание параметров

выходных потоков в соответствии с заданием при минимуме затрат по параметрам входных потоков.

Таким образом, состояние потоков: структуры и параметры являются основными характеристиками технологического процесса энергоблока, отражающими его состояние  $S_t$  в каждый момент времени  $t$ . При этом рассогласование между состоянием энергоблока, определяемым целью управления (Target State)  $ST_t$ , и фактическим состоянием (Factual State)  $SF_t$

$$dS = (SF_t - ST_t),$$

является основой для принятого решения при определении управляющего воздействия  $U_{t+1}$  в момент времени  $t+1$ . При этом  $U_{t+1}$  возможно состоит из последовательности или набора воздействий  $U_1, \dots, U_n$  в виде команд на ИМ и/или локальные функции управления ими.

Множество потоков образуют потоковую модель энергоблока, представляемую оператору в основном в виде системы (совокупности) различных мнемосхем: обобщенная мнемосхема, групповые мнемосхемы, индивидуальные мнемосхемы и т.д. и являются основным средством представления оператору состояния энергоблока.

Управление состоянием энергоблока средствами АСУ ТП осуществляется с помощью двух классов параллельно действующих управляющих функций: автоматических и автоматизированных.

Автоматические управляющие функции, как правило, имеют локальный характер (ограниченную зону действия) и разделяются на две группы функций:

- автоматическое управление по состоянию в соответствии с заданным законом управления (П, ПИ, ПИД) - автоматические регуляторы всех типов, обеспечивающие поддержание заданного значения параметра конкретного потока (технологического процесса) или его изменение в соответствии с заданным законом в зависимости от других параметров потоков;
- автоматическое управление по событию, реализуется алгоритмами логического управления и, как правило, направленно на изменение структуры потока; эти функции используются для реализации защитных и / или блокирующих действий.

При этом, в случае необходимости оперативный персонал может взять управление «на себя» с обеспечением приоритета его команд перед всеми командами управления системами безопасности (кроме АЗ).

Указанный подход обеспечивает как функциональные, так и экономические преимущества по сравнению с другими решениями, и по-

этому им руководствуются при разработке всех частей проекта, включая управление технологическими процессами.

*Е.А. Валатин, студ.; рук. А.В. Кондрашин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ В СОСТАВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ АСУ**

Конструкция и характеристики применяемого на объектах технологического оборудования должны обеспечивать возможность реализации принятого в концепции уровня автоматизации технологических процессов.

Возможности по реализации требуемого уровня автоматизации управления энергоблоком со стороны АСУ ТП обеспечены следующими решениями:

- выбором необходимых программно-технических средств для обеспечения возможности реализации заданных функций автоматизированного и автоматического контроля и управления;
- выбором структуры комплекса технических средств АСУ ТП, обеспечивающей возможность подсистемам АСУ ТП обмениваться информацией и командами управления;
- выбором современных измерительных преобразователей (датчиков) и исполнительных механизмов;
- применением развитых средств диагностики (датчиков, исполнительных механизмов и собственно программно-технических средств).

Возникает необходимость использовать одновременно на одном объекте разнородных средств автоматизации. В результате появляется сложность взаимодействия между собой этих систем. Эту сложность возможно преодолеть с помощью СВБУ.

СВБУ (система верхнего блочного уровня) предназначена для централизованного контроля за технологическими процессами энергоблока(ЭБ) и передачи команд оператора по управлению оборудованием и механизмами систем нормальной эксплуатации (СНЭ) энергоблока, оборудованием и механизмами систем безопасности при отсутствии инициирующих сигналов на автоматический запуск СБ. Она представляет собой распределенную вычислительную систему, основными элементами которой являются автоматизированные рабочие места (АРМ), серверы и локальная вычислительная сеть.

В соответствии со структурной схемой (рис. 1) СВБУ обеспечивает прием информации от смежных систем АСУ ТП через дублированные шлюзы.

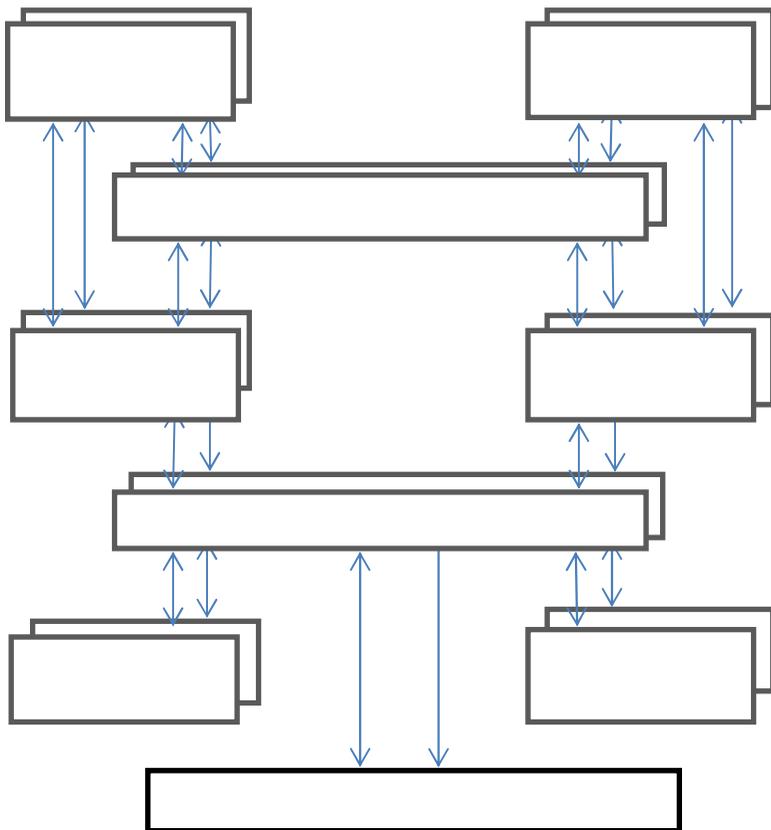


Рис. 1. Структурная схема комплекса технических средств СВБУ

ЛВС СВБУ реализованы на основе стандарта IEEE 802.3, как наиболее развитого и поддерживаемого всеми фирмами-производителями, она представляет собой единое логическое пространство для всех абонентов СВБУ. С целью уменьшения нагрузки сеть СВБУ разбита на домены, объединяющие функционально связанных по реализуемым функциям абонентов:

- информационно-управляющий домен ЛВС;
- информационный домен ЛВС;
- домен межсерверного обмена;

- домен шлюзов систем нормальной эксплуатации;
- домен шлюзов систем безопасности СБ1;
- домен шлюзов систем безопасности СБ2.

Домены реализованы также на основе коммутаторов, что обеспечивает монопольные каналы связи 100 Мбит/с для всех смежных подсистем АСУ ТП. Для обеспечения возможности резервирования все домены ЛВС СВБУ включают в себя две подсети - основную сеть и резервную сеть. Обе подсети равноправны и идентичны друг другу.

Все компоненты СВБУ обеспечивают диагностику собственных технических и программных средств и передают соответствующую информацию в серверы для ее обработки, представления и регистрации. Представление диагностической информации имеет иерархическую организацию и предоставляет различным категориям пользователей диагностику различной степени детализации.

Взаимодействие СВБУ со смежными подсистемами АСУ ТП осуществляется через шлюзы, подключенные к ЛВС СВБУ, в которых на программном уровне обеспечивается информационная совместимость соответствующих ПТК с СВБУ. Шлюзы также дублированы, они являются составной частью ПТК подсистем, информация из которых должна быть интегрирована в СВБУ. Шлюзы отвечают на запросы тех серверов, от которых поступила команда на инициализацию обменов. Данная команда передает в шлюз список параметров, необходимых для работы конкретного сервера. В качестве шлюзов могут быть использованы компьютеры промышленного исполнения.

Данные от смежных ПТК поступают параллельно в два шлюза: основной и резервный. Объем и состав сигналов для основного и резервного шлюзов идентичны. Обработка поступающей информации в основном и резервном шлюзах осуществляется параллельно.

Передача данных от шлюза серверу осуществляется в ответ на запрос данных от сервера. В ответ на первый после инициализации запрос данных шлюз передает значения всех сигналов. Элемент данных по каждому сигналу содержит его значение и метку времени в секундах и миллисекундах. В ответ на дальнейшие запросы данных шлюз передает сигналы, значения которых изменились после предыдущей передачи. Шлюз просматривает архивные кольцевые буфера и, если они не пусты, данные из них передаются серверу для архивирования.

Инициализация обмена данными сервера с резервным шлюзом происходит после установления связи (открытия каналов приема/передачи данных) аналогично инициализации обмена данными с основным шлюзом при возникновении условий перехода на работу с резервным шлюзом. После чего резервный шлюз готов к передаче

данных серверу по его запросу. Взаимодействие шлюза с резервным сервером происходит аналогично и параллельно с взаимодействием с основным сервером.

К коммутаторам информационного контура СВБУ подключено устройство передачи данных в систему верхнего станционного уровня (СВСУ). Устройство передачи данных реализует информационные функции и предназначено для передачи информации в локальный кризисный центр и подсистему начальника смены станции (НСС).

При передаче информации из ПТК на базе ППТС в СВБУ по системной шине в каждой отправленной телеграмме указывается адрес источника (модуль управления интерфейсами, отправивший телеграмму), тип программного блока, адреса приемников, указание типа телеграммы (например, телеграмма, содержащая аналоговые данные), информацию о количестве передаваемых параметров (только для телеграмм с аналогичными данными), метку времени, передаваемые данные. Защита передаваемой информации осуществляется с помощью контрольных сумм. Коды с исправлением ошибок не применяются. При обнаружении ошибки передача повторяется, при многократной ошибочной передаче абонент признается неисправным, сами данные недостоверными. ПТС СВБУ, осуществляющие прием сигналов по цифровым каналам передачи данных, должны выполнять контроль их нормального функционирования, при выявлении нарушений нормального функционирования цифрового канала передачи данных, ПТС должны формировать сообщения о недостоверности каждого из сигналов, принимаемых по соответствующему каналу.

Все абоненты разделяются на две группы: основные абоненты и вспомогательные абоненты. К основным абонентам относятся шлюзы, серверы, рабочие станции. К вспомогательным абонентам относятся сетевое оборудование, блоки мониторинга состояния оборудования, источники бесперебойного питания со встроенным SNMP протоколом, а также принтеры. Все основные абоненты подключены одновременно к основной и резервной сети. Вспомогательные абоненты подключаются только к одной сети.

В качестве транспортного протокола принят протокол TCP/IP со встроенными функциями диагностики.

*Е.Л. Архангельская ст.преподаватель  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **КАК ВЫБРАТЬ ПТК?**

В последние годы потребителям стала доступна практически вся гамма продукции средств автоматизации, выпускаемых как отечественными, так и зарубежными производителями. Это приводит к заметной растерянности потенциальных заказчиков, оказавшихся перед огромным числом различных предложений.

Поэтому выбор рационального для каждой конкретной задачи комплекса является важным для любого заказчика. В то же время определение наилучшего ПТК из всей их совокупности, имеющейся на рынке, является далеко не однозначной и не простой задачей, поскольку оно должно учитывать все свойства автоматизируемого объекта, удовлетворять поставленным требованиям к системе контроля и управления, находить некий рациональный компромисс между различными противоречивыми критериями. Надо еще учитывать и то, что рынок средств автоматизации является подвижным и динамичным: продукция быстро стареет, часто появляются новые фирмы и новые типы средств.

Ввиду этого представляется важным рассмотреть те свойства ПТК, которые отличают их с точки зрения использования, позволяют потенциальным пользователям лучше понять разницу между отдельными комплексами, связать определенные свойства объекта и требования к системе его автоматизации с характеристиками и параметрами конкретных ПТК.

Структура ПТК определяется средствами и характеристиками взаимосвязи отдельных компонентов комплекса (контроллеров, пультов оператора, модулей УСО), т.е. его сетевыми возможностями. Гибкость и разнообразие возможных структур ПТК зависит от числа имеющихся сетевых уровней, возможных типов связи на каждом уровне сети (шина, звезда, кольцо), максимального числа узлов (компонентов комплекса), подключаемых к каждой сети, скорости передачи информации при разных типах кабеля, методе доступа компонентов к сети.

Свойства и параметры основного компонента ПТК - контроллера - существенно различаются у разных производителей. Такие показатели как: рабочая частота, наличие и объем различных видов памяти, операционная система контроллера, максимальное число различных входов и выходов (аналоговых, дискретных, импульсных), которые можно подключить к контроллеру. В блоках ввода/вывода важно их имею-

щеся разнообразие в части числа сигналов, опрашиваемых одним блоком, и параметров коммутируемых ими сигналов. Для объектов пожаро- и взрывоопасных необходимо наличие искробезопасных блоков; в зависимости от особенностей заземления датчиков, от наличия электромагнитных помех может потребоваться тот или иной тип гальванической развязки. Предпочтительно иметь дело с ПТК, у которого существует ряд модификаций пультов оператора или в их качестве могут использоваться различные модификации персональных ЭВМ. Возможность выбора варианта пульта оператора обеспечивает его экономичное согласование с требуемыми параметрами, а наличие вариантов по числу мониторов на пульт и размеру их экранов, типу клавиатур (типовая, функциональная, сенсорная и т.д.), аудио сигнализации, и т.п. - влияет на удобство и комфортность работы операторов. Важными для многих применений являются динамические параметры ПТК: минимальный цикл опроса датчиков и минимальное время реакции на аварийные сигналы при их обработке в цепях аварийной защиты, минимальный цикл смены динамических данных в кадре на пульте оператора и смены самих кадров, а также минимальное время реакции на команду оператора с пульта, минимальное время перезапуска всей системы. Поскольку использование резервирования и его полнота напрямую связаны со стоимостью системы, важно правильно оценить необходимость и желательный вид резервирования разных частей ПТК в разрабатываемой системе автоматизации: частей для аварийных контуров, для блокировочных зависимостей, для контуров регулирования, для цепей контроля. Частью ПТК является его прикладное программное обеспечение, которое подразделяется на следующие части: программное обеспечение контроллеров, программное обеспечение пультов операторов (характеристики SCADA-программы), включаемые в ПТК по желанию пользователей пакеты прикладных программ, прилагаемые к ПТК программы САПР. Полнота, простота, удобство использования имеющихся инструментов создания прикладного программного обеспечения; возможность их применения технологическим персоналом, не являющимся программистами; наличие в прилагаемых программах совершенных алгоритмов управления и разнообразных пакетов обработки информации - все это определяет важнейшие показатели проектирования и эксплуатации системы автоматизации: время разработки системы и необходимую квалификацию разработчиков, эффективность эксплуатации системы и комфортность работы с ней операторов и обслуживающего персонала, возможности и легкость расширения и модернизации системы.

Для всего этого необходимо иметь достаточно подробную объективную информацию о текущем состоянии рынка автоматизации. Однако такая информация доступна только обладателями этой продукции, а потенциальные покупатели имеют совершенно случайный набор сведений об имеющейся продукции, частично основанный на журнальной рекламе, неполных описаниях отдельных систем, их показах на выставках; а частично на посещениях самих предприятий менеджерами отдельных фирм с рекламой выпускаемой ими продукции. Естественно, что вся эта информация не может претендовать ни на объективный, ни на полный анализ рынка в заданном классе продукции и, соответственно, не может служить для сопоставления ПТК и выбора группы наиболее подходящих для конкретной цели средств.

*Д.А. Чуланов, инженер ООО «ТеконАвтоматика»;  
рук. А.В. Кондрашин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СКАДА СИСТЕМЫ «ТЕКОН» И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ РАЗВИТИЯ**

В условиях активного внедрения новых и модернизации действующих автоматизированных систем управления технологическими процессами - АСУ ТП, стремительного развития микропроцессорной техники и программного обеспечения для АСУ ТП, появляется задача выбора оптимального, с точки зрения разработки и последующей эксплуатации на объекте автоматизации, варианта СКАДА-системы. Современные СКАДА-системы имеют схожие возможности и принципы функционирования, позволяют решить такие задачи как сбор, обработка, представление, архивирование и передача информации о технологическом процессе.

Среди большого разнообразия СКАДА-систем, представленных на Российском рынке, существенный интерес представляет программный продукт фирмы ООО «ТеконАвтоматика» СКАДА-система «ТЕКОН» [1]. Она предназначена для разработки и обслуживания автоматизированных систем управления технологическими процессами объектов автоматизации любого масштаба и сложности, в различных областях промышленности, состоит из следующих компонентов:

- Клиент СКАДА-системы (SCADA.Client) – выполняет функции инженерной станции: конфигурирование базы данных, разработка

и отладка технологических программ и операторского интерфейса, редактирование прав пользователей;

- Шлюз обмена информацией с источниками данных (SCADA.Server) – осуществляет прием информации от источников данных, передаче управляющих команд, диагностику работы и отправку информации в архив;
- Архивная станция (SCADA.Arhive) – осуществляет прием и запись информации, поступающей от других компонентов системы на жесткий диск компьютера;
- Расчетная станция (SCADA.Calc) – осуществляет выполнение расчетно-аналитических задач;
  - Просмотр архива (Arh) – осуществляет представление информации из архива в структурированном виде (таблицы, графики, отчеты), функции PAC;
  - OPC DA Server (SCADA.OPC) – осуществляет связь с сторонними системами по протоколу OPC;
  - Виртуальный контроллер (SCADA.TAVPLC) – выполняет функции реального контроллера: является средой исполнения технологических программ;
  - WEB контроль (WC) – осуществляет доступ к оперативной и архивной информации по средствам WEB – интерфейса.

Компоненты системы взаимодействуют друг с другом по протоколу TCP/IP. Схема взаимодействия компонентов СКАДА системы «ТЕКОН» представлена на рисунке 1.

Каждый компонент системы может работать как отдельно, так и в комбинации с другими компонентами. Для работы СКАДА системы «ТЕКОН» могут использоваться как обычные рабочие станции, так и специализированные сервера. Выбор платформы зависит от требований отказоустойчивости системы.

**Политика прав пользователей.** Механизм формирования прав пользователей гарантирует безопасное функционирование разрабатываемой системы. Система осуществляет проверку не только имени конкретного пользователя, но и наличие в базе данных учетных записей компьютера, с которого пользователь осуществляет подключение к проекту. Для систематизированного ограничения доступа к технологическим данным и органам управления отдельных технологических узлов в системе предусмотрен механизм «Срезов», который позволяет закрыть доступ к определенным видеокадрам операторской станции для отдельного пользователя. Кроме того, существует возможность настройки доступа к управляющим функциям любого графического элемента операторского интерфейса для любого пользователя.

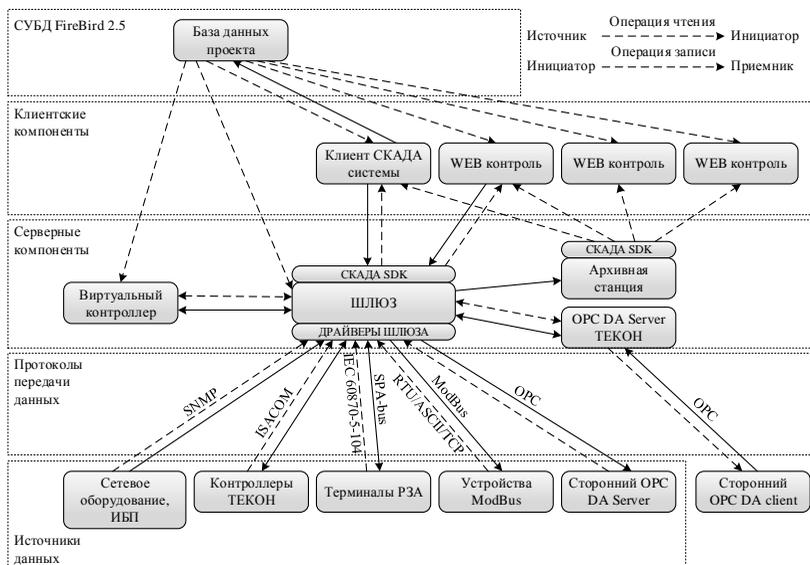


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов СКАДА системы «ТЕКОН».

**Библиотека типов.** СКАДА система «ТЕКОН» построена на основе объектно–ориентированной платформы, что позволяет значительно сократить время на разработку прикладного программного обеспечения за счет создания типов объектов с определенным набором свойств. В прикладных программах используются экземпляры созданные на основе типов, обладающие собственными свойствами. Библиотека типов выполняет функцию среды для создания и редактирования типов.

**Шаблоны прикладных программ.** В СКАДА системе «ТЕКОН» предусмотрена возможность создания шаблонов прикладных программ двух видов:

- Простые шаблоны – часть технологической программы, представляющая собой взаимосвязь ISA объектов, входящих в состав технологического типа. Возможность создания простых шаблонов реализована в составе технологических типов в библиотеке типов.
- Фиксированные шаблоны – часть технологической программы, представляющая собой функционально законченный алгоритм. Возможность создания фиксированных шаблонов реализована в графическом редакторе.

Использование простых и фиксированных шаблонов позволяет автоматически генерировать прикладные программы типовых технологических узлов, что значительно сокращает временные и трудовые за-

траты на разработку прикладного проекта а так же минимизирует количество ошибок со стороны разработчика.

**База данных проекта.** Проект представляет собой базу данных FireBird, которая позволяет работать с системой одновременно нескольким пользователям. База данных представляет собой единый файл. В системе предусмотрены механизмы резервирования базы данных и проверки базы данных на наличие ошибочной информации. База данных проекта содержит экземпляры типов, определенных в библиотеке типов, источники данных, провайдеры (шлюзы), сервера архива и компьютеры (автоматизированные рабочие места и рабочие места проектировщиков). Работа с базой данных осуществляется с помощью окна «Объекты проекта». Для работы с объектами базы данных предусмотрены механизмы импорта из Excel, поиска, замены, дублирования, фильтрации и т.д., которые в сочетании с интерфейсом, настраиваемым для каждого конкретного пользователя в соответствии с требованиями и гибкими возможностями навигации по базе данных проекта, позволяют максимально упростить процесс разработки прикладного проекта.

**Графический редактор.** Графический редактор представляет собой компонент для разработки технологических программ и элементов операторского интерфейса проекта. Для разработки прикладных программ в СКАДА системе «ТЕКОН» доступно два языка программирования «FBD» (Function Block Diagram) и «ST» (Structured Text), соответствующие стандарту МЭК 61131-3. Для разработки элементов операторского интерфейса доступен обширный инструментарий, включающий в себя простые и геометрические примитивы, элементы отображения информации и управления. Кроме того, для отображения информации и обработки данных для вывода на экран предусмотрена возможность использования скриптового языка, подобного языку программирования «Pascal».

Компонентный состав и функциональные возможности СКАДА системы «ТЕКОН» основываются на многолетнем опыте разработки, внедрения и эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими процессами на предприятиях энергетической и других отраслей промышленности. Совместная работа разработчиков СКАДА системы и персонала, связанного с проектированием и наладкой АСУ ТП позволяет в процессе разработки СКАДА системы учесть значительное количество рекомендаций и оперативно реагировать на сложности, возникающие при работе. Недостатком системы является отсутствие компонентов, обеспечивающих решение аналитических и интеллектуальных задач. Интеллектуализация является одним из глав-

ным направлений современных технологий. Необходимость интеллектуализации СКАДА систем, направленная на реализацию интеллектуальной поддержки как оператора, так и разработчика АСУ ТП, определяет направление развития системы.

#### Библиографический список

1. SCADA-система ТЕКОН. Руководство программиста. – Иваново: ООО «ТеконАвтоматика», 2013. – 212 с

*В. О. Веремьев, ассистент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПАКЕТ SMART КАК СРЕДСТВО ВВОДА-ВЫВОДА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРОВ SEGNETICS.

В пакете SMART осуществляются действия над интерфейсной частью проекта, разрабатываемого в программе SMLogix (UI-проект). Внешний вид SMART указан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид SMART.

При помощи панели управления (1) имеется возможность выполнить ряд действий по работе с элементами и настройке среды: копировать, вставить, отменить, вернуть, управление сеткой, управление рамкой элемента, управление цветом экрана, управление цветом корпуса прибора, выбор графического редактора, управление отображением всплывающих подсказок.

На панели элементов (2) размещены иконки всех поддерживаемых элементов. Окно экранов (3) служит для навигации между экранами.

Рабочим полем (4) является изображение дисплея контроллера. На него помещаются элементы интерфейса. Поддержан принцип WYSIWYG – как картинка выглядит в среде программирования, так она должна выглядеть и на контроллере. Кнопки на изображении контроллера предназначены для симуляции работы интерфейса.

Конфигуратор переходов (5) служит для создания, отображения и редактирования переходов между экранами.

В окне элементов (6) отображаются настройки выделенного элемента. Если ни одного элемента на рабочем поле не выделено, то в окне отображается список элементов.

Все изменения интерфейса передаются в SMLogix и отражаются в окне UI (рис. 2).

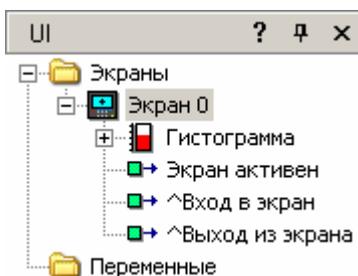


Рис. 2. Дерево проводника UI.

UI-дерево отражает структуру UI-проекта. Оно содержит в себе папки, экраны, элементы, переменные. Порядок папок и экранов в UI-дерево совпадает с их порядком в SMLogix. Переменные служат для связывания FBD-проекта и UI-проекта.

*А.А. Шарагина студ.; рук. В.Д. Таланов к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МАКРОСА «ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР» ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА SEGNETICS 2GI**

Макрос разработан для реализации импульсного регулятора для управления астатическими исполнительными устройствами. Программирование контроллера Segnetics 2Gi проводится на языке функционально – блочных диаграмм SMLogix. Структурная схема макроса приведена на рис.1.

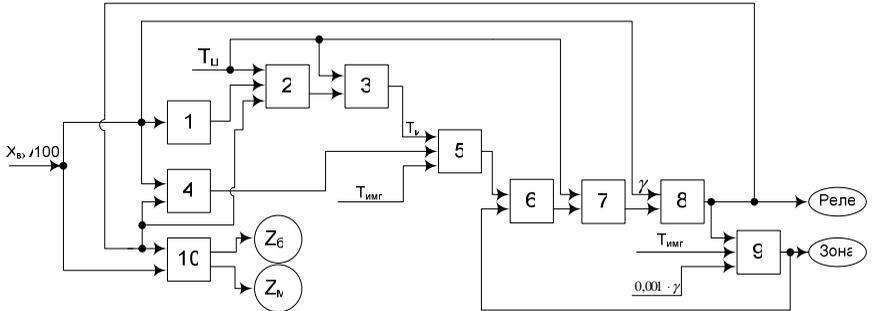


Рис. 1. Структурная схема макроса

1 – вычисление времени интегрирования (ВВИ); 2 – переключение времени интегрирования (ПВИ); 3 – сравнение времени интегрирования с временем цикла (СВИ); 4 – формирование входа интегратора (ФВИ); 5 – интегратор ШИМ (ИШИМ); 6 – сравнение выхода интегратора ШИМ с зоной нечувствительности (СВИ); 7 – сравнение времени интегрирования с «0» (СВИО); 8 – двухпозиционный релейный элемент (ДРЭ); 9 – формирование зоны (ФЗ); 10 – формирование выхода ШИМ (ФВ);  $Z_б$  – выход «меньше»;  $Z_м$  – выход «больше».

Макрос реализует преобразование входного сигнала ШИМ в скважность импульсов

$$\gamma = \text{abs}(X_{\text{вх}} / 100) .$$

Блоки, входящие в состав макроса.

ВВИ: CMP, bool->real, MUL, DIV, ADD; ПВИ: MUX; СВИ: CMP, bool->int, MUX; ФВИ: MUL, CMP, bool->int, MUX; ИШИМ: MUL, DIV, ADD, CMP, bool->int, MUX; СВИО: CMP, bool->int, MUX; ДРЭ: CMP, bool->int, MUX; ФЗ: SUB, MUX; ФВ: int->bool, CMP, NOT, AND, bool->int.

Для проверки работоспособности макроса разработана программа Test\_SHIM.

Л.С. Егорова, студ.; рук. В.Д. Таланов к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА МАКРОСА «АНАЛОГОВЫЙ РЕГУЛЯТОР С САМОБАЛАНСИРОВКОЙ» ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА SEGNETICS 2GI

Макрос разработан для управления статическими исполнительными устройствами. Программирование контроллера Segnetics 2Gi проводится на языке функционально – блочных диаграмм SMLogix. Структурная схема макроса приведена на рис.1.

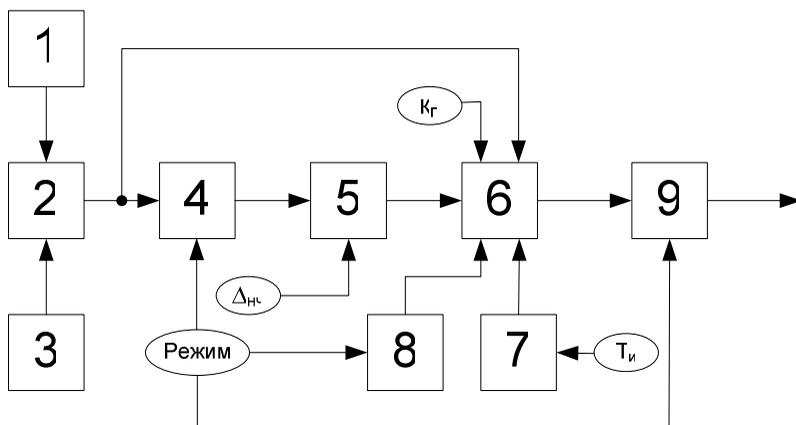


Рис. 1. Структурная схема макроса

1 – задатчик; 2 – сумматор (СМ); 3 – датчик; 4 – блок самобалансировки (БСБ); 5 – зона нечувствительности (ЗН); 6 – интегратор регулятора (ИР); 7 – сравнение времени интегрирования с нулем (СВИО); 8 – обнуление интегратора (ОИ); 9 – ограничитель выходного сигнала (ОВС);

Макрос реализует типовой алгоритм ПИ регулирования. Выходной сигнал регулятора при  $\text{abs}(e) > D_{nc}/2$  :

$$Y = K_{\Pi} \left( e + \frac{1}{T_i} \int edt \right), +100 \geq Y \geq -100.$$

При переходе с ручного режима управления на автоматический режим происходит самобалансировка для безударного включения регулятора.

Блок самобалансировки реализован на базе блока работы с энерго-независимой памятью контроллера EEPROM (real) , который организует в памяти стек по принципу FIFO (первый вошел, первый вышел).

Для проверки работоспособности макроса разработана программа Test\_PI.

*А.С. Демаков, студ.; рук. А.В. Кондрашин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА**

В настоящее время важнейшим инструментом повышения эффективности производства является модернизация АСУ ТП на базе современных микропроцессорных программно-технических комплексов (ПТК). К сожалению, во многих учебных заведениях практикуются тренажеры, с использованием устаревших средств автоматизации, которые уже не используются на реальных промышленных объектах. В связи с этим встает необходимость внедрения в учебный процесс тренажеров на базе современных ПТК.

Одной из важнейших особенностей таких тренажеров является возможность наращивания модели: от простейшей системы регулирования до полномасштабной модели энергоблока, а сопутствующее изменение операторского интерфейса даст представление об операторском интерфейсе на промышленных объектах. Создание модели не ограничивается одним программным средством, каждый выбирает то ПО, с которым он лучше всего ознакомлен. Благодаря сетевым интерфейсам допускается возможность создания распределенной модели.

Выбор же ПТК может осуществляется индивидуально. Т.к. принцип создания программ для управления моделью идентичен, то выбор ПТК ограничивается желанием, либо стремлением детально изучить определенный ПТК. Например, в качестве контроллера могут быть использованы контроллеры таких фирм, как ТЕКОН, Siemens, АВВ и др.

Ключевым звеном в данной системе, как с реальным контроллером, так и с виртуальным, является применение OPC-технологий. OPC (OLE for Process Control) — семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами. Назначение в том, что он разрабатывался с целью сократить затраты на создание и сопровождение приложений промышленной автоматизации. В начале 1990 года у разработчиков промышленного ПО возникла потребность в универсальном инструменте обмена данными с устройствами разных произ-

водителей или по разным протоколам обмена данными. Суть OPC проста — предоставить разработчикам промышленных программ универсальный фиксированный интерфейс (то есть набор функций) обмена данными с любыми устройствами. В то же время разработчики устройств предоставляют программу, реализующую этот интерфейс (набор функций). OPC DA Version 2.05a – наиболее широко используемая. В этом стандарте помимо синхронного обмена данными, введена поддержка асинхронного обмена данными. Асинхронный обмен данными позволяет продолжать выполнение программы без ожидания ответа устройства. Этот метод снижает нагрузку на сеть и должен быть рекомендован как основной.

На компьютере, где реализуется OPC-сервер, должно иметься оборудование, например плата АЦП, управляемая через драйвер с Windows или другой ОС, поддерживающее COM/DCOM. В случае отсутствия такого оборудования будет несколько сложнее. В этом случае применяется двухкомпонентный OPC-сервер. На стороне ОС, не поддерживающей COM, устанавливается сетевой модуль, который, с одной стороны, связан с приложением, а с другой – через сеть с OPC-сервером [1].

Необходимым условием для программной среды, в которой предполагается создание модели объекта, является наличие специального модуля, расширяющего возможности данной среды для взаимодействия с OPC-серверами и дальнейшем со SCADA-системой. В качестве примера, для LabView это DSC-модуль, для MATLAB – OPC Toolbox [2].

Сочетание компонентов дает вариацию в конфигурировании виртуальных комплексов. Например, возможен следующий вариант:

Модели, OPC-сервер, а также база данных и виртуальные контроллеры расположены на сетевом компьютере. В этом случае нет необходимости устанавливать программное обеспечение SCADA каждый компьютер в сети, операторские станции работают с одной базой и одной линией виртуальных контроллеров, но требования к ресурсам сетевого компьютера резко увеличиваются.

Другим вариантом реализации комплекса является размещение на сетевом компьютере только общей базы данных и OPC-сервера. Модели объектов могут храниться как на сетевом, так и на локальном компьютере, операторские станции размещены на отдельных компьютерах со своими шлюзами и виртуальными контроллерами. В этом случае нагрузка на сетевой компьютер падает. К тому же возможно объединение шлюзов и виртуальных компьютеров в сеть, тогда шлюз на первом компьютере является основным, а на втором – резервным [3].

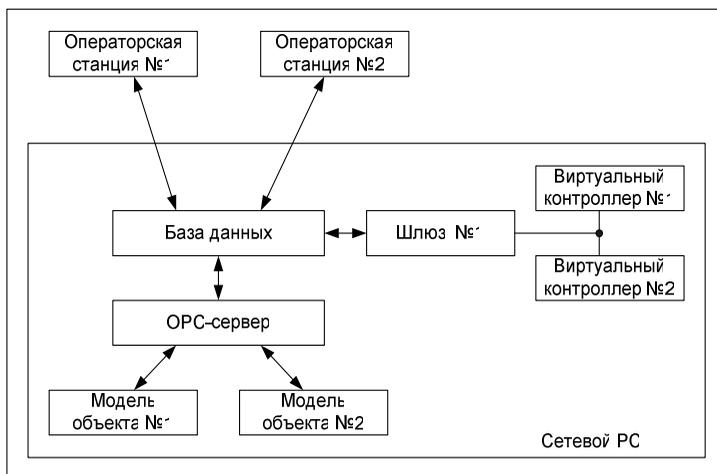


Рис.1. Вариант №1 структуры виртуального комплекса.

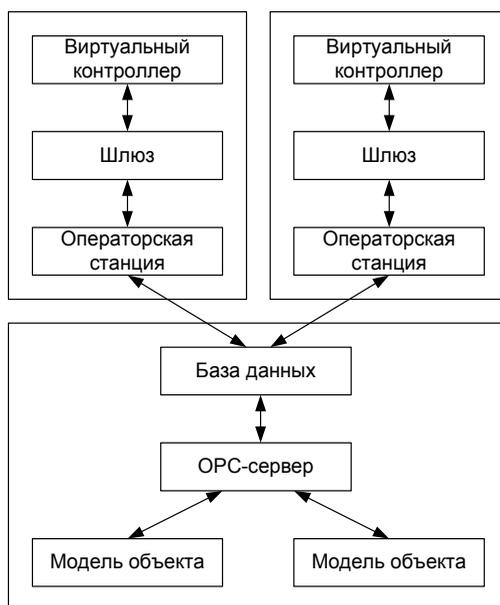


Рис.2. Вариант №2 структуры виртуального комплекса.

Выбор того или иного варианта реализации определяется ресурсной обеспеченностью компьютеров.

Обслуживание виртуального комплекса заключается в периодической диагностике локальной сети, работоспособности сервера, персональных компьютеров и программных компонентов, создание резервной базы данных на случай порчи или утраты, а также, во избежание нарушения связей обмена данными, распределение прав пользователей при непосредственной работе вычислительной системой. Эксплуатация же комплекса определяется условиями эксплуатации компьютеров, входящих в данную ЛВС.

Таким образом, применение виртуальной среды для создания динамических систем позволит адаптировать тренажер под конкретного пользователя, а внедрение в учебный процесс не только даст представление о технологических процессах и управлении ими на реальных объектах, но и повысит эффективность подготовки специалистов в целом.

#### Библиографический список

1. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/OPC>
2. URL: <http://www.labview.ru/products/33/item951>
3. SCADA-система ТЕКОН. Руководство программиста. – Иваново: ООО «ТеконАвтоматика», 2013. – 212 с.

*С.О. Воробьев, В.Н. Кожаяев, студ.;*  
*рук. И.В. Тетеревков, ст. преподаватель (ИГЭУ, г. Иваново)*

### **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Развитие микропроцессорной техники дает отличные возможности для применения в системах управления сложных алгоритмов и построения систем с различной структурой. Постоянно возрастающий уровень сложности задач и повышение требований к качеству работы привели к появлению такого класса технических средств, как интеллектуальные системы. Одним из типичных представителей подобных систем являются нейронные сети. Они могут с успехом применяться для решения задач идентификации, прогнозирования, распознавания образов и управления технологическими процессами.

Нейронные сети [1] обладают рядом достоинств, отсутствующих у традиционных технических средств и присущих человеческому мозгу:

это способность к обучению и обобщению, адаптивность и абстрагирование.

Основой сети являются нейроны, объединенные в слои и соединенные между собой с помощью синаптических связей. Нейрон представляет собой нелинейный элемент, в общей структуре которого можно выделить 3 основных элемента:

1. Набор синапсов или связей, каждая из которых характеризуется своим весом.
2. Сумматор, складывающий входные сигналы, взвешенные относительно соответствующих синапсов нейрона.
3. Функция активации, ограничивающая амплитуду выходного сигнала нейрона.

Общая модель нейрона показана на рис. 1. В математическом представлении функционирование нейрона  $k$  можно описать следующей парой уравнений:

$$a_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j, \quad y_k = \varphi(a_k + b_k),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные сигналы;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  – синаптические веса нейрона  $k$ ;

$a_k$  – линейная комбинация входных воздействий;

$b_k$  – порог;

$\varphi$  – функция активации;

$y_k$  – выходной сигнал нейрона.

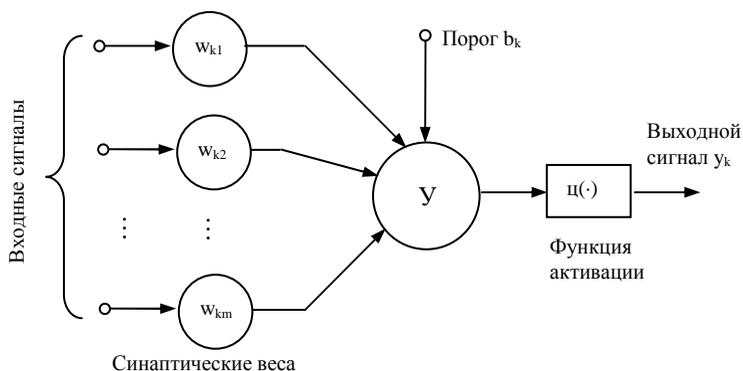


Рис. 1. Общая модель нейрона

Функция активации может иметь различный вид [2]. Наиболее распространены функции в виде единичного скачка (пороговая функция),

сигмоидальная функция и функция на основе гиперболического тангенса.

Первый слой нейронов сети называется входным, последний – выходным, промежуточные слои называются скрытыми. В зависимости от количества скрытых слоев различают однослойные и многослойные сети.

Процедура обучения выстраивает в определенном порядке синаптические веса нейронной сети для обеспечения необходимой структуры их взаимосвязей. Многообразие алгоритмов обучения определяется функциональным назначением сети, ее архитектурой и избранной стратегией обучения. Различают три основных стратегии: "с учителем", "без учителя" (т. е. с самообучением) и смешанную. В первом случае нейросеть настраивается по заданной обучающей выборке в соответствии с принятым правилом или алгоритмом. Во втором случае заранее не требуется знать правильный результат обучения и в процессе настройки весовых коэффициентов образуется внутренняя структура активированных базовых элементов, соответствующая предъявленному вектору входа сети. При смешанной стратегии обучения часть весовых коэффициентов настраивается по заданной обучающей выборке, а другая – в соответствии с правилами обучения "без учителя".

Одним из основных методов обучения является метод ВР (алгоритм обратного распространения ошибки). Он разработан для обучения статических нелинейных многослойных нейросетей и использует технологию последовательной и послойной настройки базовых процессорных элементов, начиная с последнего, выходного слоя и заканчивая настройкой элементов первого слоя.

В работе рассматривается трехслойная нейронная сеть (рис. 2). Количество нейронов в скрытом слое менялось в ходе исследований. Самонастройка системы проводится в два этапа.

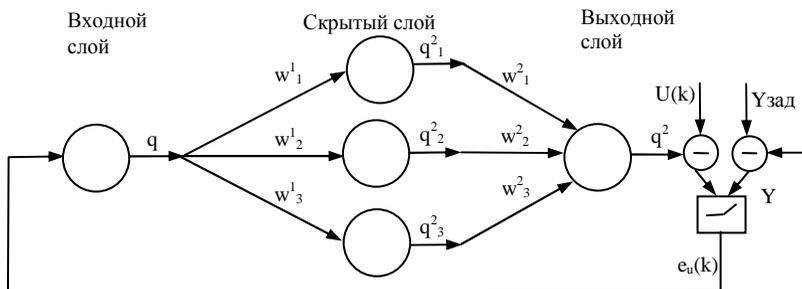


Рис. 2. Структура обучаемой нейронной сети

Сначала нейронная сеть работает по принципу стратегии обучения "с учителем". На вход сети приходит ошибка, под которой понимается разность выходного сигнала сети и управляющего сигнала некоторого "идеального" регулятора (собственно, и выступающего в роли учителя)  $U(k)$ . Управление объектом ведется с помощью регулятора.

После завершения процесса обучения сеть в точности повторяет выходной сигнал регулятора, то есть действует так же, как и учитель.

На втором этапе регулятор отключается от сети и объекта, значения весов синаптических связей, полученные в процессе обучения, фиксируются как базовые и на вход сети поступает ошибка управления в ее классическом понимании (как разность между заданным  $Y_{зад}$  и действительным значением регулируемой величины  $Y$ ). Сеть начинает управлять технологическим объектом, при этом продолжая обучаться, но уже самостоятельно.

Для рассматриваемого случая последовательность действий и основные расчетные формулы метода обратного распространения выглядят следующим образом.

1. Выходной сигнал нейронной сети:

$$q^2 = q_1^2 \cdot w_1^2(k) + q_2^2 \cdot w_2^2(k) + q_3^2 \cdot w_3^2(k)$$

2. Расчет весов скрытого слоя

$$w_i^2(k) = w_i^2(k-1) - \gamma_1 \cdot (U(k) - q_1^2) \cdot q, \quad i = 1 \div 3 - \text{первый этап};$$

$$w_i^2(k) = w_i^2(k-1) - \gamma_1 \cdot (0 - q_i^2) \cdot q, \quad i = 1 \div 3 - \text{второй этап},$$

где  $\gamma_1$  – параметр, определяющий скорость обучения;

$U(k)$  – сигнал от "учителя".

3. Выходные сигналы нейронов скрытого слоя рассчитываются в соответствии с их функциями активации.

4. Расчет весов входного слоя

$$w_i^1(k) = w_i^1(k-1) - \gamma_2 \cdot \frac{d\varphi_i(w_i^1(k-1) \cdot q)}{d(w_i^1(k-1) \cdot q)} \cdot w_i^2 \cdot e_u(k) \cdot q^2, \quad i = 1 \div 3,$$

где  $\gamma_2$  – параметр, определяющий скорость обучения;

$e_u(k)$  – ошибка на  $k$ -м такте расчета;

$\varphi_i(\dots)$  – функция активации  $i$ -го нейрона.

Рассматриваемая структура реализована в ПТК Квинт. В работе исследовалось качество работы нейронной сети для объекта в виде аperiodического звена второго порядка с запаздыванием. На рис. 3. показана отработка нейронной сетью с тремя скрытыми элементами (функция активации – сигмоидальная) возмущения заданием в +3%.

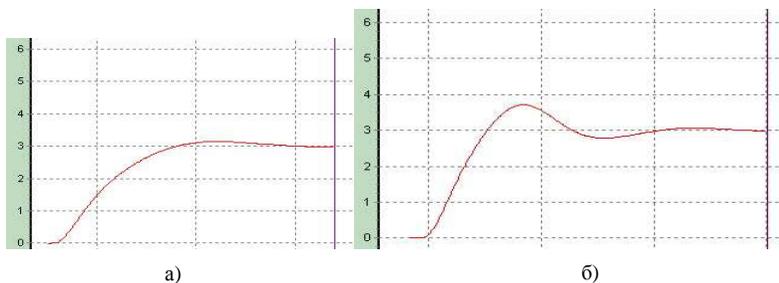


Рис. 3. Обработка сигнала задания нейронной сетью с тремя скрытыми элементами  
а – при  $\gamma = 0.01$ , б – при  $\gamma = 0.02$ .

Заметное улучшение качества работы системы достигается за счет увеличения количества нейронов в скрытом слое, также как и за счет увеличения количества слоев. В отличие от обычного ПИД-регулятора, нейронная сеть успешно справляется с регулированием, если объект имеет нелинейные свойства, и не теряет устойчивости при параметрических возмущениях (например, при увеличении коэффициента усиления объекта в несколько раз).

#### Библиографический список

1. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изда-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.– 744 с.
2. **Терехов В.А.** Тюкин И.Ю. Ефимов Д.Б. Нейросетевые системы управления: Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности "Управление и информатика в технических ВУЗах"/ – М.: Высшая школа, 2002.– 183 с.

*С.О. Воробьев, В.Н. Кожяев, студ.;*  
*рук. И.В. Тетеревков, ст. преподаватель*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## НЕЙРО ПИД-РЕГУЛЯТОР И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Контроллеры, реализующие ПИД-закон регулирования, имеют давнюю историю в управлении промышленными объектами. Они зарекомендовали себя как надежные, простые и устойчивые средства для многих реальных приложений. ПИД-регуляторы пригодны для многих практических задач благодаря простоте их структуры и принципов работы. Основной проблемой при использовании ПИД-регулятора является тот факт, что жесткий закон регулирования не способен самостоятельно адаптироваться к изменениям технологической ситуации, например, при сильном проявлении нестационарности свойств

объекта. В подобных случаях оперативному персоналу приходится производить подстройку коэффициентов регулятора.

Нейро ПИД-регулятор [1] отличается от обычного тем, что, при сохранении закона регулирования, изменяет коэффициенты собственной настройки для улучшения качества работы. Нейронная сеть в этом случае используется вместо человека-оператора так, что обеспечивается минимизация ошибки управления путем настройки ПИД-коэффициентов.

На рис. 1 показана общая структура управления для обучения ПИД-контроллера с самонастройкой.

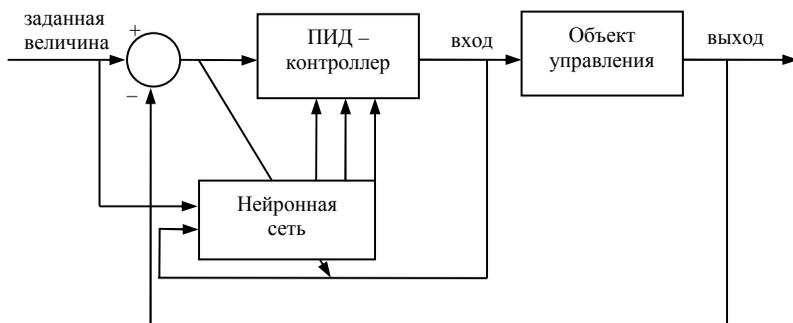


Рис. 1. Система управления с нейро ПИД-контроллером

ПИД-контроллер с дискретным временем описывается уравнениями

$$u(t) = u(t-1) + K_p(e(t) - e(t-1)) + K_i e(t) + K_d(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)),$$

$$e(t) = r(t) - y(t),$$

где  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  – ПИД-коэффициенты;

$r(t)$  – заданное значение управляемого параметра объекта;

$y(t)$  – реальное значение управляемого параметра.

Используя трехслойную нейронную сеть [2], реализуем обучающее правило для поиска подходящих значений ПИД-коэффициентов. Таким образом, выходными сигналами выходного слоя будут величины  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ , обозначенные через  $O(1)$ ,  $O(2)$  и  $O(3)$  соответственно. Задав функцию стоимости  $E$ , подлежащую минимизации в виде

$$E = 0.5e^2(t + 1),$$

на основе алгоритма наискорейшего спуска получим для выходного слоя

$$\Delta w_{kj}(t+1) = \eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} + \alpha \Delta w_{kj}(t),$$

для скрытого слоя

$$\Delta w_{ji}(t+1) = \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} + \alpha \Delta w_{ji}(t).$$

Здесь  $w_{kj}$  – вес связи между  $k$ -м нейроном выходного слоя и  $j$ -м нейроном скрытого слоя;

$w_{ji}$  – вес связи между  $j$ -м нейроном скрытого слоя и  $i$ -м нейроном входного слоя;

$b$  – константа, определяющая влияние предыдущего изменения весов на текущее направления движения в пространстве весов связей;

$z$  – параметр, определяющий скорость обучения.

Определим, что

$$\delta_k = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_k},$$

где  $\text{net}_k = \sum_j w_{kj} O_j + \theta_k$ ,  $\theta_k$  – пороговая величина.

Обозначим выход  $k$ -го нейрона выходного слоя через  $O(k)$ . Тогда имеем  $O(k) = f(\text{net}_k)$ . Учтем, что значения ПИД-коэффициентов не ограничены диапазоном от 0 до 1. Поэтому после выхода сети  $O(k)$  можно использовать некоторый коэффициент передачи  $c$ , такой, что  $O(k) = cf(\text{net}_k)$ ,  $c > 0$ . Параметр  $c$  также можно определить путем обучения, увеличивая количество нейронов в скрытом слое.

Алгоритм обучения ПИД-нейроконтроллера с самонастройкой можно представить в следующей форме.

Шаг 1. Присвоить начальные значения  $w_{kj}, w_{ij}, \theta_k, \theta_j, \eta, \alpha$ . Установить  $t = 0$  и перейти к шагу 2.

Шаг 2. Вычислить значения  $e(t+1) = r(t+1) - y(t+1)$  и

$$\delta_k = e(t+1) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} O(k)(1-O(k)) \frac{\partial u(t)}{\partial O(k)}, k = 1, 2, 3, \text{ где}$$

$$\frac{\partial u(t)}{\partial O(k)} = \begin{cases} e(t) - e(t-1) & k = 1 \\ e(t) & k = 2 \\ e(t) - 2e(t-1) + e(t-2) & k = 3 \end{cases}.$$

Шаг 3. Найти  $\Delta w_{kj}(t+1) = -\eta \delta_k O_j + \alpha \Delta w_{kj}(t)$ .

Шаг 4. Вычислить  $\delta_j = \sum_k \delta_k w_{kj} O_j (1 - O_j)$ .

Шаг 5. Найти  $\Delta w_{ji}(t+1) = \eta \delta_j O_i + \alpha \Delta w_{ji}(t)$ .

Шаг 6. Установить  $t \rightarrow t+1$  и перейти к шагу 2.

Рассмотренный алгоритм реализован в визуальном симуляторе VisSim. На рис. 2 показаны процессы в системах с обычным и нейро ПИД-регуляторами.

Анализ работы показал, что подстройка коэффициентов регулятора с помощью нейронной сети действительно улучшает качество регулирования, например, для приведенных процессов обычный регулятор дает значение показателя  $I2 = 593$ , а нейро ПИД – регулятор дает  $I2 = 249$ .

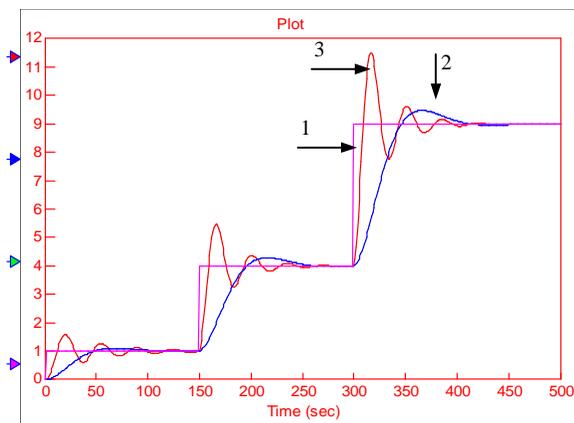


Рис. 2. Переходные процессы в системе  
1 – задание, 2 – обычный ПИД-регулятор, 3 – нейро ПИД-регулятор.

#### Библиографический список

1. **Сигеру Омату.** Нейроуправление и его приложения кн. 2 /Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубик Юсоф, пер с англ. Н.В. Батина, под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина – М.:ИПРЖР, 2000.– 272 с. Ил (Нейрокомпьютеры и их применение)
2. **Терехов В.А.** Тюкин И.Ю. Ефимов Д.Б. Нейросетевые системы управления: Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности "Управление и информатика в технических ВУЗах"/ – М.:Высшая школа, 2002.– 183 с.

*Д.Ю. Кузнецов, студ.;*

*рук. И.В. Тетеревков, ст. преподаватель (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПОСТРОЕНИЕ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ $H^\infty$ -ТЕОРИИ**

Практика показала, что оптимальные системы, синтезированные по квадратическому критерию качества, являются чувствительными к параметрам реального объекта и характеристикам входных воздействий, т. е. являются негрубыми, и теряют оптимальность, а иногда и работоспособность, когда априорная информация об объекте и внешней среде известна не точно, а с некоторой достоверностью, задаваемой интервалами принадлежности.

Важность решение задач синтеза регулятора и оценивание состояния с учетом неопределенности в модели объекта и характеристиках входных воздействий обусловлена тем, что практически в любой инженерной задаче конструирования системы управления присутствует неопределенность (или ошибка) в модели объекта и в знании класса входных возмущений.

Поэтому возникает задача робастного управления, целью которой является синтез такого регулятора, который обеспечивал бы хорошее качество управления (к примеру, запасы устойчивости), если объект управления отличается от расчетного или его математическая модель неизвестна. Таким образом, робастность означает малое изменение выхода замкнутой системы управления при малом изменении параметров объекта управления. Системы, обладающие свойством робастности, называются робастными (грубыми) системами. Обычно робастные контроллеры применяются для управления объектами с неизвестной или неполной математической моделью, и содержащими неопределенности.

Главной задачей синтеза робастных систем управления является поиск закона управления, который сохранял бы выходные переменные системы и сигналы ошибки в заданных допустимых пределах несмотря на наличие неопределенностей в контуре управления. Неопределенности могут принимать любые формы, однако наиболее существенными являются шумы, нелинейности и неточности в знании передаточной функции объекта управления.

Решение данной задачи может производиться через критерий оптимальности на основе  $H^\infty$ -нормы многомерной передаточной функции замкнутой системы [1].  $H^\infty$ -норма может служить мерой усиления сис-

темы, по сути это есть энергия выхода системы при подаче на вход сигнала с единичной энергией.

Для решения задачи  $H^\infty$ -оптимизации используется "2-Риккати подход". Суть подхода заключается в том, что оптимальная задача заменяется субоптимальной. "2-Риккати подход" сочетает в себе классическую теорию автоматического управления и метод пространства состояний.

Постановка задачи производится в частотной области, а ее решение осуществляется с помощью метода пространства состояний. Данный подход позволяет разработчикам в процессе проектирования задавать требуемые характеристики качества и робастной устойчивости замкнутой системы. Объект управления рассматривается в виде

$$\begin{cases} \tilde{X} = A\tilde{X} + B_1\tilde{W} + B_2\tilde{U}; \\ \tilde{Z} = C_1\tilde{X} + D_{11}\tilde{W} + D_{12}\tilde{U}; \\ \tilde{Y} = C_2\tilde{X} + D_{12}\tilde{W} + D_{22}\tilde{U}, \end{cases}$$

где  $\tilde{X}$  – вектор состояния;  
 $\tilde{Y}$  – вектор измерений;  
 $\tilde{Z}$  – вектор контроля;  
 $\tilde{U}$  – вектор управления;  
 $\tilde{W}$  – внешний вход системы.

В рамках "2-Риккати подхода" искомый оптимальный регулятор строится в форме наблюдателя:

$$\begin{cases} \dot{X}_C = A_C X_C + B_C \tilde{Y}; \\ \tilde{U} = C_C X_C, \end{cases}$$

где  $X_C$  – вектор внутренних координат наблюдателя, а остальные матрицы находятся из

$$\begin{cases} A_C = A - B_2 B_2^T X_\infty - (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} Y_\infty C_2^T + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty; \\ B_C = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} Y_\infty C_2^T; \\ C_C = -B_2^T X_\infty, \end{cases}$$

где  $\gamma$  – малая положительная величина,

$X_\infty$  и  $Y_\infty$  – решение приведенных далее уравнений Риккати.

Матрицы пространства состояний для наблюдателя определяются на основе решения двух многомерных уравнений Лурье-Риккати. Первое уравнение описывает оптимальный фильтр

$$AY_{\infty} + Y_{\infty}A^T + Y_{\infty}(C_2^T C_2 - \gamma^{-2} C_1^T C_1)Y_{\infty} + B_1^T B_1 = 0.$$

Второе соответствует понятию оптимального управления в смысле минимума  $H^{\infty}$ -нормы замкнутой системы:

$$A^T X_{\infty} + X_{\infty}A + X_{\infty}(B_2 B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T)X_{\infty} + C_1^T C_1 = 0.$$

Регуляторы, синтезированные по такому критерию, обеспечивают устойчивость замкнутой системы и минимальную чувствительность к возмущениям.

#### Библиографический список

1. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изда-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.– 744 с.

*Д.М. Наумов, студ.; рук. А.М. Демин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

На барабанных котлах (БК) ТЭС широко применяют трехимпульсный регулятор питания (РП) с датчиками уровня воды в барабане  $H_6$ , расхода питательной воды  $W_{пв}$  и расхода пара  $D_{пс}$  (рис. 1). АСР должна стабилизировать уровень в барабане на заданном значении  $H_{6-зд}$ .

Целью работы является сравнение качества работы одноимпульсного и трехимпульсного РП при определении параметров настройки разными способами:

- 1) одноимпульсного РП с датчиком уровня при использовании П- и ПИ-законов регулирования;
- 2) сравнение одноимпульсного РП с датчиком уровня и трехимпульсного РП при использовании П- и ПИ-законов регулирования для способов оценки параметров, применяемых к одноконтурным АСР;
- 3) сравнение работы трехимпульсной АСР для способов оценки параметров, применяемых к одноконтурной АСР и к двухконтурной АСР с эквивалентным П-регулятором (ЭПР).

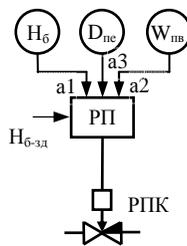


Рис. 1. Регулятор питания барабанного котла

Кроме этого проведены сравнения прямого и обратного способов расчета, применяемых для двухконтурной АСР с ЭПР, и способов расчета по экспериментальным данным в физических единицах измерения величин и сформированных непосредственно в нормированном виде, поскольку параметры настройки регуляторов устанавливаются в нормированных значениях.

Для проведения таких вариативных исследований, связанных с перестроением структуры АСР, использован тренажер «Наладка системы автоматического регулирования питания барабанного котла». При оценке параметров настройки РП по формулам ВТИ используются передаточные функции  $W(s)$  каналов объекта управления и элементов АСР, полученные путем графической обработки кривых разгона. Оценка работы РП ведется при возмущениях регулирующим питательным клапаном (РПК) и нагрузкой – расходами питательной воды и перегретого пара) по данным протокола, формирующего показатели качества, в т.ч. динамическую ошибку  $A_1$  и интегральный квадратичный критерий ИКК (табл. 1).

**Таблица 1. Показатели качества работы РП при расчетных параметрах настройки**

Признаки РП	Количество контуров АСР	Возмущение РПК		Возмущение нагрузкой	
		$A_1$ , мм	ИКК, мм <sup>2</sup> с	$A_1$	ИКК
Одноимпульсный П-регулятор	Одноконтурная АСР	65,6	896611	66,1	800413
Одноимпульсный ПИ-регулятор	Одноконтурная АСР	60,0	612136	62,1	628557
Трехимпульсный П-регулятор	Одноконтурная АСР	47,2	657,728	50,6	703419
Трехимпульсный ПИ-регулятор	Одноконтурная АСР	38,0	327412	43,5	377215
Трехимпульсный ПИ-регулятор	Двухконтурная АСР с ЭПР	1,6	1555	12,7	14094

Примечание. В лабораторных работах сравнивается качество работы 2-х вариантов расчета параметров настройки РП, которые представлены в выделенных строках.

Для расчета параметров настройки одноимпульсного РП с датчиком уровня при использовании П- и ПИ-законов регулирования при возмущении РПК получена кривая разгона зависимости изменения уровня воды в барабане и по ней  $W_{SH}(s)$ , которая приведена к нормированному виду,  $\%_H/\%_{PO}$ . Чувствительность по уровню  $a1=1$ , датчики по воде и пару отключены ( $a2=0$ ,  $a3=0$ ). При расчете параметров трехимпульсного регулятора с П- и ПИ-законами регулирования способом, который применяют к одноконтурным АСР, дополнительно определе-

ны чувствительности по воде и пару из условий статической неравномерности и компенсации сигналов (рис. 2).



Рис. 2. Работа трехимпульсного РП при возмущении нагрузкой (расчет ПИ-регулятора для одноконтурной АСР)

Лучший результат получен при способе, который соответствует нормативному методу [1] расчета параметров трехимпульсного ПИ-регулятора для двухконтурной АСР с ЭПР (рис. 3). Для этого дополнительно при возмущении РПК по кривой разгона зависимости расхода питательной воды получена  $W_{SW}(s)$ , % $_W$ / $\%_{PO}$ . По ней определяются параметры ПИ-регулятора и для расчета ЭПР  $W_{WH}(s) = W_{SH}(s)/W_{SW}(s)$ , % $_H$ / $\%_W$ . При этом учитываются фильтрация сигналов  $T_{\phi} = 2$  с и их масштабирование ручками чувствительности  $a_i$ .

Можно отметить, что в методике [1] отдельно описаны расчеты параметров статической и динамической настройки регулятора и не указан порядок, который должен комбинироваться при расчетах внутреннего и внешнего контуров в зависимости от свойств объекта и информационных каналов. Кроме этого в электронных регуляторах имеется ограничение на изменение положения ручек чувствительности: масштабные коэффициенты меньше 1, т.к. электрические схемы масштабирования входных сигналов не позволяют их усилить.

Применение последовательностей действий при сравнении прямого и обратного способов расчета параметров трехимпульсного ПИ-регулятора для двухконтурной АСР с ЭПР [2] представлены в табл. 2. Если при прямом способе чувствительности  $a_2$  и (или)  $a_3$  больше 1, то при невозможности их установки в электронных средствах регулирования необходимо уменьшить  $a_1$  и повторить расчет, либо применить

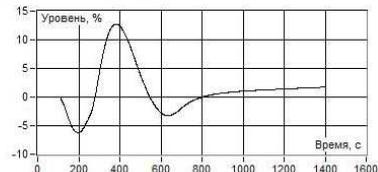
обратный способ расчета. Полученные результаты работы РП по этим способам аналогичны друг другу.

**ПРОТОКОЛ**

1. Наименование системы.  
Система автоматического регулирования питания барабанного котла
2. Состав системы.  
Датчики уровня воды, расхода воды и расхода пара..... Сапфир 22 Д  
Регулятор питания..... РП-4У  
Задатчик..... РЗД-11  
Блок ручного управления..... БРУ-42  
Пускатель..... ПР-3  
Исполнительный механизм..... МЭО
3. Данные настройки регулятора. Нагрузка 80 %.

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Чувствительность по уровню	a1	-	1,00
Чувствительность по воде	a2	-	0,91
Чувствительность по пару	a3	-	0,91
Время демпфирования	Tф	с	2
Коэффициент пропорциональности	ап	с/%	1,40
Время изодома	Tи	с	5
Зона нечувствительности	d	%	0,7
Время импульса	ти	с	0,4

4. Переходный процесс (возмущение 0 % УП)



5. Оценка качества работы

Показатели качества	Значение	Оценка
Степень затухания	0,86	отлично
Динамическая ошибка	12,7 мм	хорошо
Интегральная оценка	14094 кв. мм с	отлично

Общая оценка **ОТЛИЧНО**

Выполнил \_\_\_\_\_

15 марта 2013 г. 23:20:28

Проверил \_\_\_\_\_

**ВЫХОД**

Рис. 3. Работа трехимпульсного РП при возмущении нагрузкой (расчет ПИ-регулятора для двухконтурной АСП)

**Таблица 2. Последовательности действий при прямом и обратном способах расчета**

Прямой способ расчета		Обратный способ расчета	
Действие	Комментарий	Действие	Комментарий
a1 = 1	Задаться чувствительностью по уровню воды в барабане	a2 = 1	Задаться чувствительностью по расходу питательной воды
Определить $K_{п-3}$ по $W_{WH}(s) \cdot a1 \cdot W_{\phi 1}(s)$	Определить коэффициент передачи ЭПР для астатического объекта (внешний контур)	Определить $K_{п-3}$ и $T_{п-3}$ по $W_{SW}(s) \cdot a2 \cdot W_{\phi 2}(s)$	Определить параметры ПИ-регулятора для статического объекта (внутренний контур)
$a2 = a1 \frac{m_H}{m_W K_{п-3}}$	Определить чувствительность по расходу воды	$a3 = a2 \frac{m_W}{m_D}$	Определить чувствительность по расходу пара
Определить $K_{п-3}$ и $T_{п-3}$ по $W_{SW}(s) \cdot a2 \cdot W_{\phi 2}(s)$	Определить параметры ПИ-регулятора для статического объекта (внутренний контур)	Определить $K_{п-3}$ по $W_{WH}(s) \cdot a1 \cdot W_{\phi 1}(s)$	Определить коэффициент передачи ЭПР для астатического объекта (внешний контур)
$a3 = a2 \frac{m_W}{m_D}$	Определить чувствительность по расходу пара	$a1 = a2 \frac{m_W}{m_H} K_{п-3}$	Определить чувствительность по уровню
$X_{зон} \leq (0,01 \dots 0,02) \cdot (H_1 + H_2) \cdot m_H / a1$	Определить зону нечувствительности	$X_{зон} \leq (0,01 \dots 0,02) \cdot (H_1 + H_2) \cdot m_H / a1$	Определить зону нечувствительности

Примечания. 1. Формулы соответствуют пересчетам параметров из физических единиц измерения величин в нормированный вид. 2.  $H_1$  и  $H_2$  – уставки срабатывания аварийного слива воды из барабана и включения аварийного питательного насоса.

Сравнение способов расчета по экспериментальным данным в физических единицах измерения величин и сформированных непосредственно в нормированном виде также показало аналогичные результаты. Поскольку параметры настройки регуляторов устанавливаются в нормированных значениях, то для их оценки целесообразно формировать исходные данные непосредственно в нормированном виде.

В целом примененные способы не показали противоречий типовым методам расчета параметров РП. Порядок работ при экспериментальной настройке РП аналогично обратному способу расчета двухконтурной АСР с ЭПР обеспечивает лучшие показатели качества работы.

#### Библиографический список

1. **Методические** указания по наладке регуляторов питания барабанных паровых котлов: МУ 34-70-135-85 / СО 34.26.726. – Введ. 1986-10-01. – М.: Союзтехэнерго, 1987. – 56 с.
2. **Демин А.М.**, Таланов В.Д., Плетников С.Б. Наладка системы автоматического регулирования питания барабанного котла. Регулирующий прибор РП4-У: метод. указания / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 48 с.

*П.С. Пенюгалов, студ.; рук. А.М. Демин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ), г. Иваново*

## РЕАЛИЗАЦИЯ АСР ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ С КОНТРОЛЛЕРОМ АВВ

Для барабанных котлов (БК) ТЭС основным определяющим фактором качественной работы всех регуляторов является стабилизация количества воды в циркуляционной системе, показателем которого является уровень воды в барабане.

Качество работы внутрибарабанных устройств зависит от статической и динамической точности работы АСР в условиях действующих внешних и внутренних возмущений, статических, динамических и спектральных свойств измерительных каналов, ограничений на перемещение РПК.

Поэтому автоматическая система регулирования (АСР) питания должна обеспечивать инвариантность по заданному уровню от всех влияющих факторов и переменных свойств объекта.

Целью работы является разработка АСР БК на лабораторном стенде с контроллером АВВ.

Способ достижения результата:

- 1) изучение контроллера и его возможностей в составе стенда;

- 2) структурный синтез АСР, обеспечивающей требуемое качество инвариантности;
- 3) реализация нелинейной модели объекта в составе АСР;
- 4) анализ результатов параметрического синтеза.

В составе стенда применяется система управления *Industrial IT 800xA AC 800M* компании АВВ. Она характеризуется следующими преимуществами [1]:

- расширяемая конструкция;
- открытая архитектура, обеспечивающая поддержку стандартизированных шин, сетей и протоколов обмена данными;
- интегрирование с устройствами, прошедшими аналогичную сертификацию (приводы, электродвигатели, клапаны, контрольно-измерительные приложения более высокого уровня);
- широкие возможности технического обслуживания (комплексные функции самодиагностики и «горячей замены»);
- гибкий ввод/вывод для любой производственной среды;
- широкая функциональность управления в соответствии с любыми требованиями.

На рис. 1. представлена АСР питания, которая обеспечивает инвариантность статических свойств по уровню с помощью КР и динамических свойств путем изменения параметров настройки АСР в зависимости от  $K_p$  и  $T_i$  регулятора питания (РП) по сигналу задания через нелинейные элементы (НЭ) [2]:

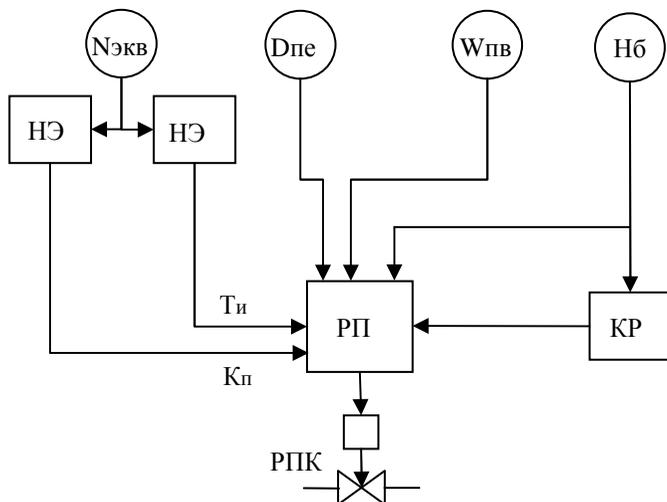


Рис. 1. Структурная схема АСР питания БК

Разработка нелинейной модели АСР питания БК осуществляется в приложении *Project Explorer Control Builder M Professional*. *Control Builder* – это программа, предназначенная для создания проектов с использованием системы управления *Industrial IT 800xA AC 800M*. Преимуществами использования *Control Builder M Professional*:

- поддержка режима многопользовательского программирования;
- поддержка режима оценки и тестирования приложений;
- поддержка пяти языков программирования (*Function Block Diagram, Structured Text, Instruction List, Ladder Diagram and Sequential Function Chart*, а также возможность реализации программы при помощи контрольных модулей);
- поддержка испытаний в режиме имитации и в режиме *Online*.

Следует отметить, что результаты разработки модели при помощи функциональных блоков (*FBD*) показали отсутствие в этой библиотеке блока звена запаздывания. Однако звено запаздывания присутствует в библиотеке контрольных модулей (*CMD*).

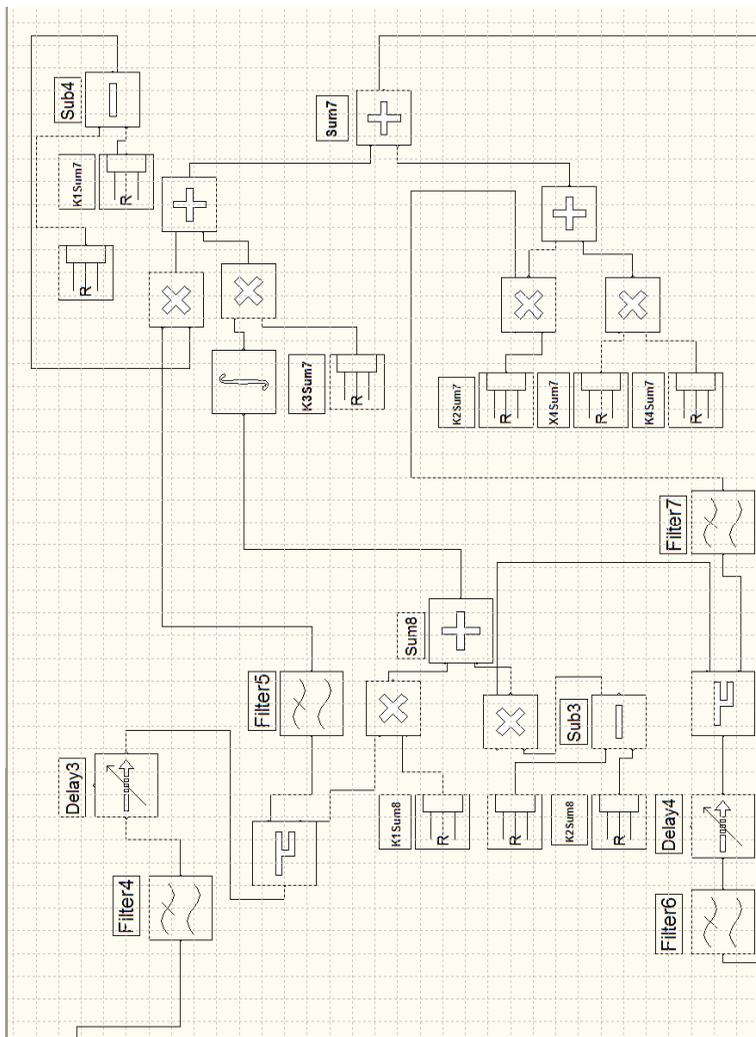


Рис. 2. Вариант модели циркуляционной системы котла

Поэтому реализация модели циркуляционной системы котла осуществляется на основе *CMD*. В составе модели присутствуют следующие элементы (рис. 2.):

- 4 контрольных модуля *FilterCC* (предназначен для формирования инерционного звена типа апериодическое звено первого порядка);

- 2 контрольных модуля *DelayCC* (представляет собой звено чистого запаздывания);
- 4 контрольных модуля *AddCC*, 6 контрольных модулей *MultiCC*, 2 контрольных модуля *SubCC* и 9 контрольных модулей *RealToCC* (используются для обеспечения масштабирования и суммирования сигналов);
- 2 контрольных модуля *BranchCC* (предназначен для разделения канала связи на 2 равные ветви);
- 1 контрольный модуль *IntegratorCC* (предназначен для интегрирования с ограничением) и др.

Контрольные модули *FilterCC*, *DelayCC*, *AddCC*, *MultiCC*, *SubCC* и *IntegratorCC* находятся в библиотеке *ControlExtendedLib*. Контрольные модули *RealToCC*, *BranchCC* – в библиотеке *ControlStandartLib*.

В настоящее время осуществляется разработка нелинейных элементов АСР. Система предусматривает дальнейшую модификацию, а также исследование АСР с переменными параметрами настройки. Следовательно, появляется задача разработки рабочего интерфейса.

Работа ведется с целью выявления возможностей программного обеспечения и аппаратных средств для вариантов реализации АСР питания БК с нелинейной моделью. В ходе выполнения работы удалось выяснить, что система управления *Industrial IT 800xA AC 800M* позволяет создавать модели нелинейных объектов и обеспечивать требуемую статическую и динамическую инвариантность работы системы.

К достоинствам контроллера и учебного стенда можно отнести такие качества, как наличие обширной библиотеки функциональных блоков и контрольных модулей, гибкий интерфейс, а также возможность реализации пользователем собственных элементов системы управления.

К недостаткам средства относится несовместимость функциональных блоков и контрольных модулей в одной программе, запускаемой при тестировании.

#### Библиографический список

1. **ABB**. Industrial IT Extended Automation System 800xA. «System Version 5.0 SP1 Released Documents», September 2007.
2. **Демин А. М.** Система регулирования питания водой барабанного парогенератора // Патент № 2426943 от 20.08.2011. – Бюллетень ФИПС, 2011, № 23.

*А.Ю.Ефремов, студ.; рук. А.М. Демин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ), г. Иваново*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДУВКИ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ С КОНТРОЛЛЕРОМ АВВ**

Одним из условий надежной работы барабанных парогенераторов ТЭС является обеспечение требуемого качества котловой воды, т.к. вынос растворенных в воде солей в поверхности перегрева пара приводит к их пережогу, а в турбину – может привести к вибрации и поломке лопаток. Качество питательной воды определяется нормами. К основным показателям качества относятся:

- общее солесодержание (концентрация солей в пересчете на соли натрия NaCl);
- избыток концентрации фосфатов (содержание ионов  $PO_4^{3-}$ ).

В процессе парообразования в котловой воде постепенно накапливаются соли. Повышение концентрации растворенных солей и примесей выше допустимой понижает надежность работы оборудования. Поэтому они удаляются с непрерывной продувкой, которая осуществляется из специальных соленых отсеков барабана или выносных циклонов.

Расход воды с непрерывной продувкой зависит от параметров пара (мощности энергоустановки), качества воды и способа водоподготовки. Он регламентируется в пределах 0,5...3 % от максимальной производительности котла, при пуске – 2...5% [1]. Потери теплоты с продувкой лишь частично возвращаются в тепловую схему станции с конденсатом пара из расширителей. Поэтому уменьшение солесодержания котловой воды за счет превышения допустимого расхода воды на продувку уменьшает экономичность энергоустановки.

Целью работы является изучение возможностей контроллера, разработка и исследование автоматической системы регулирования (АСР) непрерывной продувки на лабораторном стенде с контроллером *АС 800М* фирмы *ABB* с системой управления *Industrial IT 800xA* в среде *Control Builder M Professional*. Решение данной проблемы требует проведения анализа свойств объекта, взаимодействия регулятора непрерывной продувки (РНП) с регулятором питания котла, требований к надежности работы оборудования. Это делает рассматриваемую проблему актуальной.

Особенности и преимущества контроллера *АС 800М* [2]:

- модульность и универсальность для применения в реальном времени для разновременных процессов;
- простота расширения, которая обеспечивается техническими и программными средствами;
- решение задач управления многократным использованием элементов библиотек;
- отказоустойчивость, которая обеспечивает эксплуатационную готовность;
- применение карты памяти для хранения задач и данных, которая формирует требуемые свойства системы и др.

РНП обеспечивает выработку пара необходимой чистоты путем изменения расхода котловой воды на непрерывную продувку. Расход продувочной воды устанавливается, исходя из нормативных требований

в зависимости от нагрузки и режима работы котла, а также результатов его теплотехнических испытаний. Типовые схемы РНП представлены на рис. 1 [2].

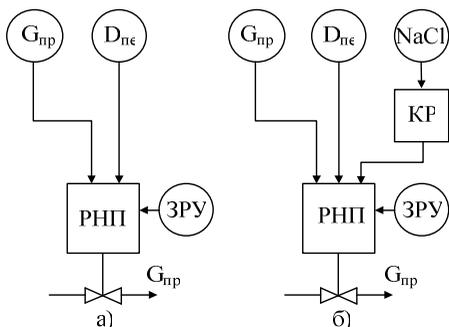


Рис. 1. Типовые схемы РНП: а) двухимпульсная АСР; б) трехимпульсная АСР с КР

изменяет расход продувочной воды  $G_{пр}$  в зависимости от паропроизводительности  $D_{пс}$  (нагрузки), стабилизируя соотношения этих двух параметров в пределах требований норм (рис. 1, а). При этом величина непрерывной продувки определяется не общим солесодержанием котловой воды, а концентрацией кремниевой кислоты. Допустимое отклонение  $C(\text{SiO}_2)$  гарантирует поддержание в пределах нормы общего солесодержания котловой воды. Из-за отсутствия датчиков концентрации кремниевой кислоты ее содержание в котловой воде оценивают по косвенным показателям:  $D_{пс}$  и  $G_{пр}$ . При этом требуемая зависимость между содержанием кремниевой кислоты,  $D_{пс}$  и  $G_{пр}$  определяется специальными теплехимическими испытаниями котла.

На рис. 2 представлен тренд изменения солесодержания котловой воды во времени. По графику, на котором представлены сигналы, сформированные в нормированном виде, эксплуатационному персона-

лу видно, что РНП в автоматическом режиме работы на барабанном котле Ивановской ТЭЦ-3 поддерживают солесодержание котловой воды в заданном диапазоне.

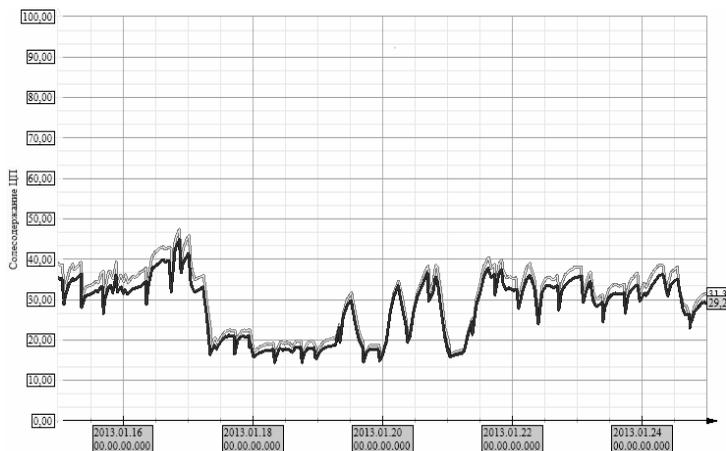


Рис. 2. Графики изменения солесодержания котловой воды в соленых отсеках барабана за 10 дней с 15 по 25 января 2013 года

В отличие от косвенного управления солесодержанием по соотношению  $D_{пе}$  и  $G_{пр}$  (рис.1, а) в альтернативной трехимпульсной схеме (рис.1, б) на РНП подается дополнительный сигнал от корректирующего регулятора (КР). Каскадная схема обеспечивает стабилизацию общего солесодержания путем прямого измерения параметра по сигналу от датчика NaCl. При этом заданное значение не должно быть заниженным из условий экономичности и не должно быть завышенным, соответствуя требованиям норм и проведенным испытаниям, а также диапазонам изменения положения регулирующих клапанов в требуемом диапазоне изменения нагрузок котла.

По своим динамическим свойствам участок регулирования солесодержания типичен для тепловых инерционных объектов. Стабилизация уровня в барабане регулятором питания (РП) обеспечивает необходимые статические свойства этого ТОО, как устойчивого объекта с самовыравниванием. Такое взаимодействие важно для всех каналов регулирования БК, которые в условиях формирования требуемой инвариантности статических и динамических свойств работы циркуляционной системы с АСР питания при изменении эксплуатационных условий обеспечивают качественную работу энергоустановок ТЭЦ и блочных ТЭС в регулировочных режимах. Подчиненность РНП работе РП

не накладывает требования минимизации инерционности процессов в автоматическом режиме. Поэтому оба варианта структуры РНП, в которые заведены тот же сигнал  $D_{пе}$ , что и в РП, параметрически должны обеспечивать качественную работу регулятора уровня. Они не должны быть источниками дополнительных возмущений для РП, т.е. параметры РНП должны формировать требуемые динамические свойства канала (инерционность и устойчивость). Этому способствуют свойства ТООУ, запаздывание и постоянная времени которого по сигналу соле-содержания при возмущениях  $D_{пе}$  и  $G_{пр}$  в зависимости от типа котла составляет  $(\phi+T)=10...20$  мин. Инерционность измерительных устройств по качеству котловой воды (1...3 мин.) существенного влияния на параметрический синтез РНП не оказывает.

Таким образом при разработке модели АСР непрерывной продувки на контроллере АВВ поставлена задача обеспечить с помощью РНП требуемые свойства автоматизированного ТООУ аналогичные реальному объекту путем регулирования соле-содержания в соответствии с требованиями норм.

Разработка и исследование модели АСР непрерывной продувки осуществляется в среде *Control Builder M Professional*, которая имеет следующие преимущества:

- пять языков программирования:
  - *Function Block Diagram (FBD)*;
  - *Structured Text*;
  - *Instruction List*;
  - *Ladder Diagram*;
  - *Sequential Function Chart*;
- режим тестирования приложений;
- режим имитации и режим онлайн.

Кроме библиотеки функциональных блоков (*FBD*) имеется библиотека контрольных модулей (*CMD*). Поскольку разработка АСР непрерывной продувки в составе учебного стенда зависит от особенностей создания АСР питания с ее заданными свойствами и должна быть с ней совместима, то в рамках исследования РНП рассматриваются варианты совместного решения этих двух задач в водопаровом тракте котла.

#### Библиографический список

1. **Тепловые** и атомные электрические станции: Стравочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 91 – 92.
2. **АС\_800M\_Controller\_Overview**.
3. **Плетнев Г.П.** Автоматизация технологических процессов и производств в тепло-энергетике: учеб. для вузов / Г.П. Плетнев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – С. 223 – 225.